



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности
Направление подготовки Приборостроение
Отделение школы Отделение контроля и диагностики

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Разработка метрологического обеспечения измерения эффективного атомного номера УДК <u>620.179.152.1.08:539.144</u>

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ72	Камышева Екатерина Николаевна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ведущий научный сотрудник РКНЛ РКД	Осипов С.П.	к.т.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Фадеева В.Н.	к.ф.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ТПУ	Федорчук Ю.М.	д.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД	Вавилова Г.В.	к.т.н.		

Томск – 2019 г.

Запланированные результаты обучения по программе

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
P1	Применять навыки эффективной индивидуальной и командной работы, включая руководство командой, работу по междисциплинарной тематике с учетом этики и корпоративных интересов, в том числе и на иностранном языке.	Требования ФГОС (УК-1, УК-3, УК-4, УК-5, УК-6, ОПК-1, ОПК-2, ПК-12), CDIO Syllabus (2.1, 2.3, 2.4, 2.5, 3.1, 3.2, 3.3, 4.1), Критерий 5 АИОР (п. 2.2, п. 2.3, п. 2.4, п. 2.5, п. 2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.008 Специалист по организации и управлению научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами, 40.158. Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю.)
P2	Применять навыки управления разработкой и производством продукции на всех этапах ее жизненного цикла с учетом инновационных рисков коммерциализации проектов, в том числе в нестандартных ситуациях.	Требования ФГОС (УК-1, УК-2, УК-6, ОПК-2, ОПК-3, ПК-6, ПК-8), CDIO Syllabus (2.1, 2.4, 2.5, 3.2, 4.1, 4.2, 4.3, 4.6, 4.7, 4.8), Критерий 5 АИОР (п. 2.1, п. 2.3, п. 2.5, п. 2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (29.004 Специалист в области проектирования и сопровождения производства оптоэлектроники, оптических и оптико-электронных приборов и комплексов, 40.053 Специалист по организации постпродажного обслуживания и сервиса, 40.158 Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю, 06.005 Инженер-радиоэлектроник, 29.006 Специалист по проектированию систем в корпусе, 40.011 Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам)
P3	Собирать, хранить, обрабатывать, использовать, представлять и защищать информацию при соблюдении требований информационной безопасности и корпоративной культуры.	Требования ФГОС (УК-5, УК-6, ОПК-1, ПК-1, ПК-3, ПК-4, ПК-9), CDIO Syllabus (1.1, 2.2), Критерий 5 АИОР (п. 1.1, п. 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.158 Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю.
P4	Применять навыки планирования, подготовки, проведения теоретических и экспериментальных исследований, а также представления и интерпретации полученных результатов.	Требования ФГОС (УК-1, УК-2, ОПК-2, ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-8, ПК-9), Критерий 5 АИОР (п. 1.1, п. 1.2, п. 1.4), CDIO Syllabus (2.1, 2.2, 4.3), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.158 Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю, 40.008 Специалист по организации и управлению научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами)
P5	Разрабатывать нормативную, техническую и методическую документацию в области неразрушающего контроля и измерительной техники.	Требования ФГОС (УК-1, УК-2, ОПК-2, ПК-3, ПК-9, ПК-11), CDIO Syllabus (1.2, 4.4), Критерий 5 АИОР (п. 1.3, п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.158 Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю, 06.005 Инженер-радиоэлектроник)
P6	Быть готовым к комплексной профессиональной деятельности при разработке инновационных и эффективных методов и средств измерения и контроля.	Требования ФГОС (УК-1, УК-2, ОПК-2, ОПК-3, ПК-5, ПК-6, ПК-8, ПК-10, ПК-11, ПК-13, ПК-14, ПК-15), CDIO Syllabus (1.2, 1.3, 2.3, 4.1, 4.4, 4.5), Критерий 5 АИОР (п. 1.2, п. 1.3, п. 1.4, п. 1.5, п. 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (19.016 Специалист по диагностике линейной части магистральных газопроводов, 29.004 Специалист в области проектирования и сопровождения производства оптоэлектроники, оптических и оптико-электронных приборов и комплексов, 40.158 Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю, 06.005 Инженер-радиоэлектроник, 40.010 Специалист по техническому контролю качества продукции, 40.011 Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам, 29.006 Специалист в области проектирования и сопровождения производства оптоэлектроники, оптических и оптико-электронных приборов и комплексов)
P7	Разрабатывать и внедрять энерго- и ресурсоэффективные технологические процессы производства приборных систем с использованием высокотехнологичных средств измерения и контроля.	Требования ФГОС (УК-2, УК-6, ОПК-3, ПК-7, ПК-8, ПК-10, ПК-11, ПК-12, ПК-14, ПК-15), CDIO Syllabus (1.3, 4.1, 4.2, 4.5, 4.6), Критерий 5 АИОР (п. 1.2, п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (19.016 Специалист по диагностике линейной части магистральных газопроводов, 29.004 Специалист в области проектирования и сопровождения производства оптоэлектроники, оптических и оптико-электронных приборов и комплексов, 40.053 Специалист по организации постпродажного обслуживания и сервиса)

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности
Направление подготовки Приборостроение
Отделение школы Отделение контроля и диагностики

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП
_____ Г.В. Вавилова
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ72	Камышева Екатерина Николаевна

Тема работы:

Разработка метрологического обеспечения измерения эффективного атомного номера
--

Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 9732/с от 11.12.2017
---	------------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2019
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	1. Объект исследования – это досмотровые комплексы с функцией распознавания материалов методом дуальных энергий. 2. Предмет исследования – метрологические характеристики процесса измерения эффективного атомного номера. 3. Цель исследований: разработка метрологического обеспечения оценки эффективного атомного номера
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Разработать математическая модель способа измерения эффективного атомного номера на основе оценки ослабления рентгеновского излучения. 2. Предложить способ подход к оценке чувствительности способа измерения эффективного атомного номера методом дуальных энергий на основе сэндвич-детектора. 3. Исследовать устойчивость алгоритма оценки эффективного атомного номера к шумам в исходной информации. 4. Определить допустимые диапазоны

	изменения эффективного атомного номера и массовой толщины 5. Исследовать влияние параметров сэндвич-детектора на метрологические характеристики измерителя эффективного атомного номера для различных максимальных энергий рентгеновского излучения.
Перечень графического материала	Графики
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Фадеева Вера Николаевна
«Социальная ответственность»	Федорчук Юрий Митрофанович
"Иностранный язык"	Смирнова Ульяна Александровна
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Введение	
Обзор литературы	
Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	05.10.2017

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ведущий научный сотрудник РКНЛ РКД	Осипов Сергей Павлович	к.т.н., доцент		05.10.2017

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ72	Камышева Екатерина Николаевна		05.10.2017

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ72	Камышева Екатерина Николаевна

Школа	ИШНКБ	Отделение школы	ОКД
Уровень образования	Магистр	Направление	Приборостроение

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, научных изданиях, нормативно-правовых документах
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	Определены потенциальные потребители . Проведён SWOT-анализ
2. Разработка устава научно-технического проекта	Проведён – анализ разработки метрологического обеспечения эффективного атомного номера
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Расчет формирование затрат бюджета на проект
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Проведена оценка ресурсной эффективности исследования
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):	
Диаграмма Ганта	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	11.03.2019
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Фадеева В.Н.	к.ф.н.		11.03.2019

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ72	Камышева Екатерина Николаевна		11.03.2019

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ72	Камышева Екатерина Николаевна

Школа	ИШНКБ	Отделение школы (НОЦ)	ОКД
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	Приборостроение

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследования является эффективный атомный номер, алгоритм его вычисления и метрологическое обеспечение. Область применения – цифровая радиография (досмотровый контроль)
--	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Производственная безопасность</p> <p>1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты; – (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства). <p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – механические опасности (источники, средства защиты); – термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); <p>пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).</p>	<p>Анализ выявленных вредных факторов: повышенный уровень электромагнитных излучений, отклонение показателей микроклимата, недостаточная освещенность рабочей зоны, расчет освещения и схема размещения светильников на потолке, ионизирующее излучение, повышенный уровень шума на рабочем месте.</p> <p>Анализ выявленных опасных факторов: статическое электричество, электробезопасность, пожароопасность, пожары.</p> <p>Удары электрическим током при эксплуатации оборудования. Тушение оборудования только углекислотным, пенным или порошковым огнетушителем. план эвакуации.</p>
<p>2. Экологическая безопасность:</p> <ul style="list-style-type: none"> – защита селитебной зоны – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу 	<p>Утилизация люминесцентных ламп, компьютеров, офисной мебели, наличие отходов (остатки проводов) потребовали разработки методов (способов) утилизации перечисленных отходов.</p>

(отходы); разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.	
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях: <ul style="list-style-type: none"> – перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.	Рассмотрены 2 ситуации ЧС: 1) природная – сильные морозы зимой; 2) техногенная – несанкционированное проникновение посторонних на рабочее место; предусмотрены мероприятия по обеспечению устойчивой работы производства.
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	Приведены перечень НТД, используемых в данном разделе, организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.
Перечень графического материала: 1) План эвакуации при пожаре 2) План помещения и размещения светильников	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	11.03.2019
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ТПУ	Федорчук Ю.М.	д.т.н.		11.03.2019

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ72	Камышева Екатерина Николаевна		11.03.2019

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности
 Направление подготовки (специальность) Приборостроение
 Уровень образования Магистратура
 Отделение школы (НОЦ) Отделение контроля и диагностики
 Период выполнения (осенний / весенний семестр 2018 /2019 учебного года)

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2019
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
09.10.2018	Литературный обзор	15
15.11.2018	Разработка метрологического обеспечения измерения эффективного атомного номера	20
12.04.2019	Разработка программного обеспечения макета	20
20.05.2019	Раздел "Социальная ответственность"	15
21.05.2019	Раздел "Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение"	15
22.05.2019	Раздел "Иностранный язык"	15

СОСТАВИЛ: Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ведущий научный сотрудник РКНЛ РКД	Осипов Сергей Павлович	к.т.н., доцент		05.10.2017

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД	Вавилова Г.В.	к.т.н.		05.10.2017

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 120 с., 13 рис., 23 табл., 56 источников, 2 прил.

Ключевые слова: рентгеновское излучение, досмотровый контроль, распознавание материалов, метод дуальных энергий, эффективный атомный номер, сэндвич-детектор; погрешность измерения.

Объект исследования – досмотровые комплексы с функцией распознавания материалов методом дуальных энергий.

Предмет исследования – метрологические характеристики процесса измерения эффективного атомного номера.

Цель работы – разработка метрологического обеспечения оценки эффективного атомного номера.

Разработана математическая модель способа измерения эффективного атомного номера на основе оценки ослабления преимущественно мягкого и преимущественно жёсткого рентгеновского излучения, включающая в себя следующие метрологические характеристики: обобщённое уравнение измерителя; алгоритм обработки информации; оценку чувствительности способа; исследование устойчивости к шумам в исходной информации; допустимые диапазоны изменения эффективного атомного номера и массовой толщины. Исследовано влияние параметров сэндвич-детектора на метрологические характеристики измерителя эффективного атомного номера для различных максимальных энергий рентгеновского излучения.

Экономическая эффективность и значимость работы заключается в разработке подхода к научному обоснованию достижимости метрологических характеристик проектируемого измерителя эффективного атомного номера методом дуальных энергий в досмотровом контроле на базе разделения преимущественно мягкого и преимущественно жёсткого рентгеновского излучения сэндвич-детектором.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанная модель и вспомогательные программы могут быть использованы для обоснования достижимости метрологических характеристик проектируемых измерителей эффективного атомного номера одно-энергетическим методом дуальных энергий в системах досмотрового контроля.

Нормативные ссылки

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1. ГОСТ Р МЭК 61223-3-5-2008 Оценка и контроль эксплуатационных параметров в отделениях лучевой диагностики. Часть 3-5. Приемочные испытания. Оценка эксплуатационных характеристик рентгеновской аппаратуры для компьютерной томографии
2. ГОСТ 17038.–79. Детекторы ионизирующих излучений сцинтилляционные. Метод измерения спектрометрической постоянной фотоэлектронного умножителя, используемого для определения сцинтилляционных параметров детекторов.
3. МЭК 60601-2-44:2001 Медицинские электрические изделия. Часть 2-44. Частные требования безопасности рентгеновского оборудования для компьютерной томографии.
4. МЭК 60522:1999 Определение собственной фильтрации рентгеновского излучателя.
5. МЭК 61267:1994 Медицинская диагностическая рентгеновская аппаратура. Параметры излучения, необходимые для определения характеристик.
6. ИСО 5725-1:1994 Точность методов измерения и результатов. Часть 1. Общие принципы и определения.
7. ИСО 5225-2:1994 Точность методов измерения и результатов. Часть 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерения.
8. ИСО 5225-3:1994 Точность методов измерения и результатов. Часть 3. Промежуточные измерения точности стандартного метода измерения
9. ИСО 5225-4:1994 Точность методов измерения и результатов. Часть 4. Основные методы определения правильности стандартного метода измерения.
10. ИСО 5225-6:1994 Точность методов измерения и результатов. Часть 6. Использование на практике точных значений.
11. ГОСТ 18061-90 Толщиномеры радиоизотопные. Общие технические условия.
12. ГОСТ 20337-74 Приборы рентгеновские. Термины и определения.

13. ГОСТ 22091.14-86 Приборы рентгеновские. Метод измерения плотности потока энергии (плотности потока фотонов) рентгеновского излучения.
14. ГОСТ 25113-86 Контроль неразрушающий. Аппараты рентгеновские для промышленной дефектоскопии. Общие технические условия.
15. ISO 15708-1:2017(en) Non-destructive testing — Radiation methods for computed tomography — Part 1: Terminology.
16. ISO 15708-2:2017(en) Non-destructive testing — Radiation methods for computed tomography — Part 2: Principles, equipment and samples.
17. ISO 15708-3:2017(en) Non-destructive testing — Radiation methods for computed tomography — Part 3: Operation and interpretation.
20. DIN 6866-10-1986 Digital methods in diagnostic imaging; X-ray computed tomography; characteristic parameters and evaluation criteria.
30. СанПиН 2.6.1.2523-09 "Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009".

Сокращения:

- ОК – объект контроля
- ИРИ – источник рентгеновского излучения
- АЦП – аналого-цифровой преобразователь
- МКО – массовый коэффициент ослабления излучения
- ИДК – инспекционный досмотровый контроль
- ПР – параметр распознавания
- ДЦР – двухэнергетическая цифровая радиография
- ЛКО – линейный коэффициент ослабления излучения
- ММЭ – метод мульти-энергий
- МДЭ – метод дуальных энергий
- ЭАН – эффективный атомный номер
- СанПиН – санитарные нормы и правила

Обозначения:

- E_{max} – максимальная энергия рентгеновского излучения, кэВ

E – энергия рентгеновского (гамма-) фотона

$f(E, E_{max})$ – энергетический спектр рентгеновского излучения

E_L – «мягкое» излучение

E_H – «жесткое» излучение

F – фокусное расстояние

ρ – плотность материала

Z_{eff} – эффективный атомный номер

H – толщина ОК

ρH – массовая толщина ОК

m – МКО материала ОК

h_d – толщина РОП или РПП

$\varepsilon(E, h_d)$ – энергетическая зависимость ЭР рентгеновского (тормозного) излучения

Оглавление

Введение.....	16
1 Обзор литературы	21
2 Математическая модель способа измерения эффективного атомного номера, основанная на оценке ослабления «преимущественно мягкого» и «преимущественно жёсткого» рентгеновского излучения.....	29
2.1 Структура и характеристики измерителя эффективного атомного номера, основанного на оценке ослабления «преимущественно мягкого» и «преимущественно жёсткого» рентгеновского излучения	29
2.1.1 Параметры источника рентгеновского излучения	30
2.1.2 Параметры регистратора рентгеновского излучения	30
2.1.3 Объект контроля	31
2.1.4 Параметры геометрической схемы сканирования объекта контроля	32
2.2 Формирование предварительной информации по ослаблению фотонного излучения с веществом.....	33
2.3 Формирование цифровых радиографических изображений.....	34
2.3.1 Формирование виртуальных радиографических изображений.....	34
2.3.1 Трансформация виртуальных изображений в цифровые радиографические изображения	36
3 Анализ системы уравнений для измерителя эффективного атомного номера методом дуальных энергий	39
3.1 Существование и единственность решения для системы уравнений измерителя эффективного атомного номера методом дуальных энергий.....	39
3.2 Расчёт якобиана, числа обусловленности для системы (10) и смещения оценки эффективного атомного номера	43
3.3 Влияние параметров системы досмотрового контроля на зависимость $\Delta Z_{\text{eff}}(Z)$	45
3.3.1 Влияние максимальной энергии рентгеновского излучения E_{max} на зависимость $\Delta Z_{\text{eff}}(Z)$	45
3.3.2 Влияние толщины h_L радиационно-чувствительного преобразователя первого детектора сэндвича на зависимость $\Delta Z_{\text{eff}}(Z)$	46

3.3.3 Влияние толщины h_F промежуточного фильтра сэндвича на зависимость $\Delta Z_{eff}(Z)$	47
3.3.3 Влияние толщины h_H радиационно-чувствительного преобразователя второго детектора сэндвича на зависимость $\Delta Z_{eff}(Z)$	48
4 Оценка точности измерения эффективного атомного номера одно-энергетическим методом дуальных энергий.....	50
4.1 Оценка систематической погрешности измерения эффективного атомного номера	50
4.2 Оценка статистической составляющей погрешности измерения эффективного атомного номера	52
4.2.1 Выбор толщины радиационно-чувствительного преобразователя первого детектора сэндвича	53
4.2.2 Выбор толщины промежуточного фильтра сэндвича	54
4.2.3 Выбор толщины радиационно-чувствительного преобразователя второго детектора сэндвича	56
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	58
5.1 Потенциальные потребители	58
5.2 SWOT-анализ	59
5.3 Оценка готовности проекта к коммерциализации	61
5.4 Планирование работ по научно-техническому исследованию	63
5.2.1 Определение трудоемкости выполнения работ.....	64
5.2.2 Разработка графика проведения научного исследования	64
5.3 Бюджет научного исследования.....	67
5.3.1 Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ.....	67
5.3.2 Основная заработная плата.....	68
5.3.3 Дополнительная заработная плата исполнителей темы	69
5.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	70
5.3.6 Формирование бюджета затрат научного исследования.....	71
5.4 Оценка целесообразности исследования.....	71
6 Социальная ответственность	73
6.1 Производственная безопасность	74

6.2 Анализ выявления вредных факторов	75
6.2.1 Расчёт освещённости рабочего места.....	75
6.2.2 Микроклимат рабочего помещения.....	81
6.2.3 Электромагнитное излучение.....	83
6.3 Анализ выявления опасных факторов	85
6.3.1 Электробезопасность.....	85
6.3.2 Шум.....	87
6.3.3 Ионизирующее излучение	89
6.3.4 Пожаровзрывобезопасность	91
6.4 Экологическая безопасность	92
6.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	93
6.6 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	96
Заключение	100
Список публикаций.....	101
Список использованных источников	102
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	108
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.	120

Введение

Любой химический элемент характеризуется атомным номером. Эта характеристика принимает целочисленные значения. Большая часть природных и промышленных материалов являются химическими веществами, смесями, сплавами. Эффективный атомный номер является естественным расширением понятия «атомный номер» применительно к радиационной физике. Более точно – к разделам, связанным с переносом гамма-излучения и рентгеновского излучения. С математической точки зрения отмеченное расширение сводится к трансформации области определения из целых чисел от 1 (водород) до 92 (уран) в область реальных чисел из того же диапазона. Под эффективным атомным номером понимается некоторое число, которое сопоставляется с экспериментальным значением характеристики некоторого процесса взаимодействия гамма- или рентгеновского излучения с материалом [1–3]. В качестве процессов взаимодействия излучения с материалом выступают поглощение (абсорбция), перенос (трансмиссия), рассеяние [4–6]. Основные применения понятия «эффективного атомного номера» относятся к дозиметрии и к распознаванию материалов. Необходимость распознавания материалов вне зависимости от массовой толщины исследуемых материалов привело к объединению различных реализаций метода дуальных энергий (МДЭ) и метода мульти-энергий с методами оценки эффективного атомного номера [7–10]. В последнее время наблюдается рост приложений именно ко второму направлению. Это связано, прежде всего, с обеспечением транспортной и национальной безопасности и необходимостью препятствовать: распространению оружия массового поражения; незаконному перемещению взрывчатки, наркотиков и сильнодействующих препаратов; контрабандному перемещению товаров. В настоящее время сфера приложений МДЭ с оценкой эффективного атомного номера расширилась в минералогии, геохимии, гидрологии, переработке твёрдых отходов и т.п. [11–13]. Существует несколько реализаций МДЭ и ММЭ. Классификации этих реализаций связаны с формированием первичной информации и методами обработки этой информации [14–16]. Реализация МДЭ на

основе разделения преимущественно мягкого и жёсткого рентгеновского излучения, осуществляемого с помощью сэндвич-детектора, является наиболее эффективным с точки зрения производительности контроля, так как сканирование объекта осуществляется пучком рентгеновского излучения с одной максимальной энергией [17–20]. В отмеченной реализации МДЭ два исходных радиографических изображения формируются за одно сканирование, причём в отличие от классической реализации МДЭ (сканирование объекта контроля двумя энергиями) в методе, основанном на регистрации рентгеновского излучения сэндвич-детектором, не наблюдается смещения радиографических изображений друг относительно друга. Развитие современного общества настоятельно требует совершенствования способов измерения эффективного атомного номера, в том числе и реализации МДЭ на основе сэндвич-детекторов. Совершенствование указанной реализации МДЭ, не в последнюю очередь, связано с разработкой метрологического обеспечения способа оценки эффективного атомного номера (ЭАН). Отметим, что любой объект контроля (ОК) характеризуется эффективным атомным номером материала и произведением плотности материала на его толщину. Это произведение называют массовой толщиной. Здесь под метрологическим обеспечением понимается совокупность подходов: для построения уравнения (уравнений) измерителя ЭАН; для определения диапазонов изменения ЭАН и массовой толщины, для которых решение указанного уравнения (уравнений) существует; для определения чувствительности способа оценки ЭАН. С метрологическим обеспечением связаны вопросы рационального выбора максимальной энергии рентгеновского излучения, параметров сэндвич-детектора (материалы первого и второго детекторов, их размеры в направлении распространения излучения, материал и толщина промежуточного фильтра).

Из сказанного выше следует, что тема диссертационных исследований является актуальной, что подтверждается возрастающим количеством исследований, посвящённых различным аспектам методов оценки эффективного атомного номера.

Объект исследований – досмотровые комплексы с функцией распознавания материалов методом дуальных энергий.

Предмет исследования – метрологические характеристики процесса измерения эффективного атомного номера.

Цель работы – разработка метрологического обеспечения оценки эффективного атомного номера.

Для достижения поставленных целей следует решить следующие задачи:

- разработать математическая модель способа измерения эффективного атомного номера на основе оценки ослабления преимущественно мягкого и преимущественно жёсткого рентгеновского излучения, включающая в себя обобщённое уравнение измерителя, алгоритм обработки информации;
- предложить подход к оценке чувствительности способа измерения эффективного атомного номера методом дуальных энергий на основе сэндвич-детектора;
- исследовать устойчивость алгоритма оценки эффективного атомного номера к шумам в исходной информации;
- определить допустимые диапазоны изменения эффективного атомного номера и массовой толщины;
- исследовать влияние параметров сэндвич-детектора на метрологические характеристики измерителя эффективного атомного номера для различных максимальных энергий рентгеновского излучения.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы: вычислений; математического и численного моделирования; системного анализа, управления и обработки информации; планирования численных и натурных экспериментов; статистической обработки результатов экспериментов, включая различные виды регрессионного анализа.

Научная новизна:

- разработана математическая модель способа измерения эффективного атомного номера на основе оценки ослабления преимущественно мягкого и преимущественно жёсткого рентгеновского излучения, включающая в себя обобщённое уравнение измерителя, алгоритм обработки информации;

- предложен подход к оценке чувствительности способа измерения эффективного атомного номера методом дуальных энергий на основе сэндвич-детектора;
- исследована устойчивость алгоритма оценки эффективного атомного номера к шумам в исходной информации;
- определены допустимые диапазоны изменения эффективного атомного номера и массовой толщины;
- исследовано влияние параметров сэндвич-детектора на метрологические характеристики измерителя эффективного атомного номера для различных максимальных энергий рентгеновского излучения.

Практическая значимость результатов работы состоит в том, что полученные в результате проведенных исследований результаты могут быть использованы для проектирования новых и модернизации действующих систем досмотрового контроля багажа и ручной клади с целью повышения точности оценки эффективного атомного номера материалов объектов контроля и их структурных фрагментов.

Реализация результатов работы. Результаты выполненных исследований реализованы в математической модели способа оценки эффективного атомного номера в варианте метода дуальных энергий на основе разделения мягкой и жёсткой составляющих рентгеновского излучения сэндвич-детектором, в рекомендациях по выбору параметров досмотровой системы: максимальной энергии рентгеновского излучения; толщин первого и второго детекторов сэндвича; толщины промежуточного фильтра.

Апробация работы. Основные положения выпускной квалификационной работы обсуждались на отчетах по НИР отделения контроля и диагностики ИШ НКБ в 2017 – 2019 годах.

Публикации. По результатам исследований в 2018 году опубликована статья в журнале «Дефектоскопия» (БАК), переводная версия Russian Journal of Nondestructive Testing (SOPUS, WoS).

На защиту выносятся:

- математическая модель способа измерения эффективного атомного номера на основе оценки ослабления преимущественно мягкого и преимущественно жёсткого рентгеновского излучения, включающая в себя обобщённое уравнение измерителя, алгоритм обработки информации;
- подход к оценке чувствительности способа измерения эффективного атомного номера методом дуальных энергий на основе сэндвич-детектора;
- результаты исследования устойчивости алгоритма для оценки эффективного атомного номера к шумам в исходной информации;
- оценки допустимых диапазонов изменения эффективного атомного номера и массовой толщины;
- результаты оценки влияния параметров сэндвич-детектора на метрологические характеристики измерителя эффективного атомного номера методом дуальных энергий для различных максимальных энергий рентгеновского излучения.

1 Обзор литературы

Последние два десятилетия основными средствами досмотрового контроля, используемыми таможенными, пограничными службами и подразделениями обеспечения пассажирских и грузовых перевозок различными видами транспорта, являются различные реализации рентгеновских инспекционных досмотровых комплексов (ИДК) с функцией распознавания материалов объектов контроля (ОК) [21–25]. С помощью таких ИДК подвергается анализу внутреннее содержание не только малогабаритных объектов (багаж, ручная кладь, международные почтовые отправления), но и объектов, обладающих значительными размерами (транспортные средства, контейнеры, цистерны, вагоны). Все варианты распознавания материалов ОК и их структурных фрагментов основаны на методе дуальных энергий (МДЭ) или методе мульти-энергий (ММЭ) [26–28]. В отмеченных методах используются особенности взаимодействия фотонного излучения с веществом для различных энергий. В МДЭ (ММЭ) формируется информация об ослаблении мягкой (преимущественно мягкой) и жесткой (преимущественно жесткой) составляющих рентгеновского излучения. Отмеченная информация позволяет распознавать материалы по некоторому критерию. С этим критерием связан параметр распознавания (ПР). В качестве основного параметра распознавания выступает в явном виде эффективный атомный номер материала либо некоторая функция от него, в этом случае информация об эффективном атомном номере материала используется неявно [29–31]. Существуют два подхода к понятию «метод дуальных энергий». В узком смысле МДЭ (ММЭ) – это способ (способы) получения информации об ослаблении потоков рентгеновского излучения с двумя (несколькими) различными максимальными энергиями. Изначально эта информация использовалась для компенсации артефакта немонотонности в компьютерной томографии (КТ), либо для анализа изображений в двухэнергетической цифровой радиографии (ДЦР). В широком смысле под методом дуальных энергий (ММЭ) понимается способ определения параметров объекта контроля по ослаблению рентгеновского излучения из двух

энергетических диапазонов. Любой объект контроля характеризуется тремя параметрами эффективным атомным номером Z_{eff} , плотностью ρ и толщиной H . Следует отметить, что для абсорбционных (трансмиссионных) рентгеновских методов контроля (исключение компьютерная томография) отдельно оценить плотность и толщину невозможно. Обобщённым параметром ОК является произведение плотности на толщину – ρH . Указанный параметр называется массовой толщиной (массовой плотностью, поверхностной плотностью) и измеряется в г/см^2 . Итак, метод дуальных энергий и метод мульти-энергий, трактуемые в широком смысле этих понятий, предназначены для одновременной оценки эффективного атомного номера материала ОК Z_{eff} и массовой толщины материала ρH .

В научной литературе одним из классифицирующих признаков различных реализаций МДЭ (ММЭ) является способ определения параметров ослабления для двух (нескольких) энергетических диапазонов рентгеновского излучения. Среди всей совокупности способов получения первичной радиографической информации в МДЭ (ММЭ) выделяют три способа. Каждый из трёх способов соотносится со своей реализацией МДЭ (ММЭ).

Первый способ можно назвать классической реализацией МДЭ (ММЭ). В нём объекты сканируются пучками рентгеновского излучения с двумя (несколькими), специальным образом подобранными, максимальными энергиями [27, 29, 32, 33]. Регистрация рентгеновского излучения осуществляется, как правило, одной системой детектирования. Вне зависимости от диапазонов максимальных энергий E_{max} рентгеновского излучения (диапазон кэВ или диапазон МэВ), излучение с меньшей максимальной энергией $E_{\text{max}}=E_L$ (Low Energy) с достаточной степенью условности называют мягким излучением, а с большей максимальной энергией $E_{\text{max}}=E_H$, $E_H > E_L$, – жёстким излучением (High Energy). Из предложенного описания классической реализации МДЭ (ММЭ) вытекает необходимость увеличения временных затрат в два раза (в несколько раз) на сканирование по сравнению со сканированием в ЦР. Это, разумеется, является отрицательным фактором для конечного потребителя ИДК.

Во втором способе МДЭ (ММЭ) используется источник рентгеновского излучения с одной максимальной энергией E_{\max} . Необходимые цифровые радиографические изображения формируются за одно сканирование объекта пучком рентгеновского излучения [32, 34–36]. Информация получается на основе нежесткого разделения мягкой и жесткой составляющих энергетического спектра ИРИ. В этом случае принято говорить о «преимущественно мягкой» (Law Energy) и «преимущественно жесткой» (High Energy) составляющих. Отмеченное нежесткое разделение потока регистрируемых фотонов по энергии достигается применением многоканальных регистраторов рентгеновского излучения (РРИ), каждый из каналов которых представляет собой сэндвич-детектор. Вне зависимости от типа используемого РРИ (комбинированный регистратор (КД) или регистратор прямого преобразования (РПП)), сэндвич детектор состоит из двух детекторов – первого и второго детекторов. Здесь порядок детекторов исчисляется по направлению распространения нерассеянных (первичных) фотонов рентгеновского излучения. Правильный подбор материалов и толщин радиационно-чувствительных преобразователей (РЧП) обеспечивает должное разделение на «преимущественно мягкую» (первый детектор сэндвича) и «преимущественно жесткую» (второй детектор сэндвича) составляющие рентгеновского излучения. Неполная жесткость разделения потока рентгеновских фотонов обуславливается конечной вероятностью регистрации высокоэнергетических (жестких) фотонов в первом детекторе сэндвича и конечной вероятностью прохождения через материал первого детектора низкоэнергетических (мягких) фотонов с последующей их регистрацией во втором детекторе сэндвича. Для уменьшения второй из указанных вероятностей поток рентгеновского излучения за первым детектором фильтруют, для чего используют промежуточный фильтр. Отметим, принципиального различия в применении сцинтилляторов в КД и полупроводников в ППД в качестве РЧП первого и второго детекторов сэндвича не существует.

Описанную выше реализацию метода дуальных энергий можно назвать двухдетекторной или одно-детекторной реализацией, несмотря на видимое противоречие между единственностью максимальной энергии и дуализмом

энергий. Дуализм энергий в рассматриваемом случае заключается в регистрации первым детектором сэндвича «преимущественно мягкой» составляющей рентгеновского излучения, а вторым детектором сэндвича – «преимущественно жёсткой» составляющей рентгеновского излучения.

Проиллюстрируем эффект разделения рентгеновского излучения на «преимущественно мягкую» и «преимущественно жёсткую» составляющие. Расчёты наиболее пригодных для иллюстрации информативных параметров, которыми являются числовые энергетические спектры поглощённой энергии $f_L(E_{\max}, \rho h, Z, E)$ и $f_H(E_{\max}, \rho h, Z, E)$ для РЧП первого и второго детекторов сэндвича, проводили для рентгеновского излучения с $E_{\max}=160$ кэВ и значений массовых толщин объекта контроля из алюминия ($Z=13$) $\rho h \in \{0 \text{ г/см}^2; 1 \text{ г/см}^2; 6 \text{ г/см}^2\}$. Материал РЧП первого детектора – сцинтилляционная керамика $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ (GOS), толщина – $h_L=0,5$ мм, материал РЧП второго детектора – монокристаллы CsI, толщина 10 мм, промежуточный фильтр сэндвича – из меди толщиной $h_F=0,5$ мм. Условия для расчётов близки к условиям из работ [32, 34–36].

На рисунке 1 приведены результаты расчётов числовых энергетических спектров поглощённой энергии в виде соответствующих графиков, полученных в системе для математических вычислений MathCad.

Приведённые на рисунке 1 графики наглядно демонстрируют эффект нежёсткого разделения рентгеновского излучения на «преимущественно мягкую» и «преимущественно жёсткую» составляющие. Так для РЧП первого детектора сэндвича для рассматриваемого примера среднее значение поглощённой энергии при вариации массовой толщины от 0 до 6 г/см^2 изменяется в от 40 кэВ до 80 кэВ, а для РЧП второго детектора сэндвича – от 100 кэВ до 110 кэВ.

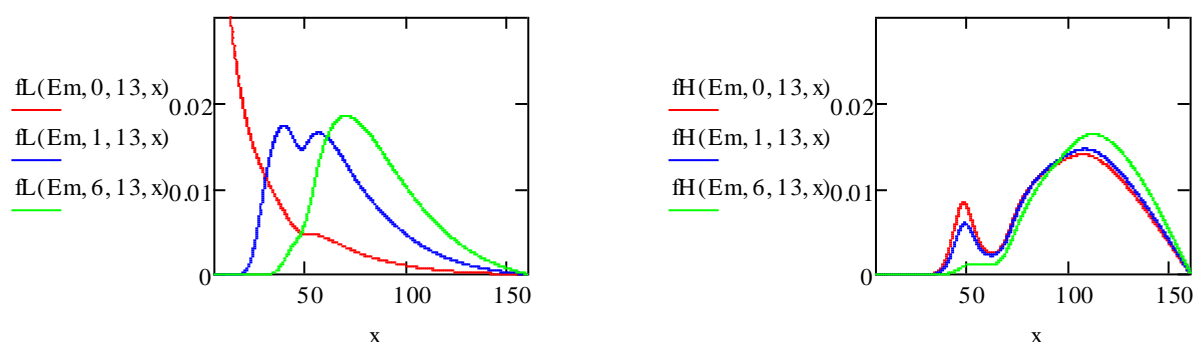


Рисунок 1. Числовые энергетические спектры поглощённой энергии $f_L(E_{\max}, \rho h, Z, E)$ и $f_H(E_{\max}, \rho h, Z, E)$ для РЧП первого и второго детекторов сэндвича

В третьем способе МДЭ (ММЭ), как и во втором способе, используется единственный источник рентгеновского излучения с одной максимальной энергией E_{\max} . Разделение же осуществляется на основе амплитудного анализа сигналов, вызванных регистрацией отдельных фотонов, с каждого детектора регистратора рентгеновского излучения. Каждый канал амплитудного анализатора формирует своё цифровое радиографическое изображение. Количество каналов свыше двух. Такое разделение фотонов по энергиям является жёстким, а режим, соответствующий регистрации рентгеновского излучения, называется спектрометрическим. В настоящее время на рынке научного оборудования представлена широкая номенклатура [37] многоканальных спектрометрических регистраторов рентгеновского излучения на основе комбинированных детекторов и на основе детекторов прямого преобразования (ДПП).

Из анализа первого, второго и третьего способов МДЭ можно сделать вывод о существенно большей эффективности второго и третьего способа по производительности контроля, что делает их выигрышными в глазах конечного потребителя инспекционных досмотровых комплексов с функцией распознавания материалов объектов контроля и их структурных фрагментов. Но третий способ обладает огромным недостатком для конечного потребителя – высокой стоимостью регистраторов рентгеновского излучения, работающих в спектрометрическом режиме регистрации. Отсюда следует ещё большая привлекательность второго способа МДЭ для конечного потребителя инспекционных досмотровых комплексов.

Исходя из анализа особенностей процессов переноса рентгеновского излучения и регистрации его в первом и втором детекторе сэндвича, можно сформулировать ряд достаточно качественно очевидных предложений, касающихся не только производительности контроля, но и метрологических характеристик проектируемых инспекционных досмотровых комплексов, применительно к рассматриваемой реализации МДЭ:

- уменьшение толщины (плотности, эффективного атомного номера материала) радиационно-чувствительного преобразователя первого детектора сэндвича приводит к уменьшению эффективности регистрации и

соответствующего числа зарегистрированных фотонов, а уменьшение числа зарегистрированных фотонов обуславливает, в свою очередь, возрастание уровня шумов в первом цифровом радиографическом изображении и в изображении параметра распознавания (в оценке эффективного атомного номера);

- увеличение толщины (плотности, эффективного атомного номера материала) РЧП первого детектора сэндвича приводит к повышению его эффективности регистрации, в результате чего снижается поток фотонов, попадающих в РЧП второго детектора сэндвича, и увеличивается уровень шумов во втором цифровом радиографическом изображении, ухудшается степень разделения «преимущественно мягкой» и «преимущественно жёсткой» составляющих рентгеновского излучения;

- уменьшение толщины (плотности, эффективного атомного номера материала) промежуточного фильтра обуславливает уменьшение качества разделения потока рентгеновских фотонов на «преимущественно мягкие» и «преимущественно жёсткие» фотоны;

- увеличение толщины (плотности, эффективного атомного номера материала) промежуточного фильтра приводит к двум разнонаправленным с точки зрения качества контроля факторам – улучшению качества разделения «преимущественно мягкой» и «преимущественно жёсткой» составляющих рентгеновского излучения (безусловно, положительный фактор) и к увеличению уровня шумов во втором радиографическом изображении и в изображении параметра распознавания (безусловно, отрицательный фактор).

Из сформулированных выше предложений вытекает существование оптимальных с точки зрения качества распознавания (точности оценки эффективного атомного номера материала объекта контроля) значений параметров первого и второго детекторов сэндвича и промежуточного фильтра.

В научной и технической литературе недостаточно рассмотрены вопросы, связанные с метрологическим обеспечением реализации метода дуальных энергий на основе разделения «преимущественно мягких» и «преимущественно жёстких» фотонов из интегрального потока рентгеновского излучения. Это касается не только вопросов, связанных с построением системы уравнений измерителя, но

вопросов, связанных с оценкой систематических и статистических погрешностей измерения эффективного атомного номера, с очерчиванием области изменения ЭАН и массовой толщины, для которых возможна однозначная оценка эффективного атомного номера материала. К метрологическому обеспечению измерителей эффективного атомного номера также относятся вопросы, связанные с влиянием максимальной энергии рентгеновского излучения и параметров детекторов сэндвича на чувствительность метода к изменению эффективного атомного номера и уровня шумов в первичных цифровых радиографических изображениях.

Из анализа литературных источников и обсуждённого выше материала можно сделать вывод об актуальности и необходимости исследований по теме диссертации, имеющих своей целью разработать метрологическое обеспечение оценки эффективного атомного номера. Из сказанного выше можно сформулировать ряд задач для реализации поставленной цели

- разработать математическую модель способа измерения эффективного атомного номера, основанную на оценке ослабления «преимущественно мягкого» и «преимущественно жёсткого» рентгеновского излучения, математическая модель должна включать в себя обобщённое уравнение (уравнения) измерителя, алгоритм обработки информации;
- проанализировать существующие подходы к оценке чувствительности способа измерения эффективного атомного номера методом дуальных энергий на основе регистраторов рентгеновского излучения из сэндвич-детекторов и осуществить выбор наиболее рационального из рассмотренных подходов;
- исследовать устойчивость алгоритма оценки эффективного атомного номера к шумам в исходных цифровых радиографических изображениях;
- определить допустимые диапазоны изменения эффективного атомного номера и массовой толщины, в которых уравнения измерителя имеют единственное решение;
- исследовать влияние параметров детекторов сэндвича на метрологические характеристики измерителя эффективного атомного номера для различных максимальных энергий рентгеновского излучения.

В последующих разделах рассмотрим подробно решение всех перечисленных выше задач применительно к измерению эффективного атомного номера способом, базирующимся на реализации метода дуальных энергий, основанной на разделении «преимущественно мягкой» и «преимущественно жёсткой» составляющих рентгеновского излучения детекторами сэндвича с промежуточным фильтром.

При написании диссертации использованы материалы статьи [38].

2 Математическая модель способа измерения эффективного атомного номера, основанная на оценке ослабления «преимущественно мягкого» и «преимущественно жёсткого» рентгеновского излучения

Математическая модель любой системы радиационного контроля и диагностики состоит из нескольких блоков. В первом блоке кратко описывается собственно структура системы, геометрическая схема формирования исходной информации с указанием основных составных элементов и их параметров. Ниже рассмотрим первый блок применительно к измерителю эффективного атомного номера для анализируемой реализации метода дуальных энергий.

При описании математической модели будем в целом придерживаться подхода, изложенного в работе [39].

2.1 Структура и характеристики измерителя эффективного атомного номера, основанного на оценке ослабления «преимущественно мягкого» и «преимущественно жёсткого» рентгеновского излучения

В последнее время при проектировании систем ЦР, КТ и ИДК используется агрегатный метод, в котором проектируемая система собирается из составляющих её структуру элементов. С этой позиции легко представить структуру измерителя эффективного атомного номера, основанного на оценке ослабления «преимущественно мягкого» и «преимущественно жёсткого» рентгеновского излучения. К основным элементам структуры такого измерителя относятся: источник рентгеновского излучения; регистратор рентгеновского излучения; сканер (устройство перемещения объекта контроля относительно неподвижной системы ИРИ+РРИ); объект контроля; алгоритм формирования первичных радиографических изображений; калибровочные объекты (тестовые объекты (ТО)); методика формирования калибровочных функций; алгоритм оценки эффективного атомного номера (возможно дополнительно алгоритм оценки массовой толщины); алгоритм визуализации конечных данных.

Дополнительным элементом структуры можно считать взаимное пространственное расположение источника и регистратора рентгеновского излучения и объекта контроля.

2.1.1 Параметры источника рентгеновского излучения

К основным параметрам источника рентгеновского излучения можно отнести следующие величины и характеристики:

- режим излучения – непрерывный или импульсный;
- максимальная энергия рентгеновского излучения – E_{\max} ;
- число фотонов, пересекающих единицу площади, например 1 см^2 , на заданном расстоянии, например, $0,5 \text{ м}$ – N_0 в единицу времени, например, секунду, для импульсного источника рентгеновского излучения единицей измерения времени логично считать импульс;
- исключительно для импульсного режима излучения, частота импульсов – ν , Гц;
- половинный угол раскрытия пучка рентгеновского излучения – φ_{\max} , ось пучка направлена на центр регистратора рентгеновского излучения;
- числовой энергетический спектр рентгеновского излучения – $f(E, E_{\max})$, здесь под числовым энергетическим спектром понимается плотность распределения случайной величины (СВ) E (энергии фотона)

$$\int_0^{E_{\max}} f(E, E_{\max}) dE = 1. \quad (1)$$

2.1.2 Параметры регистратора рентгеновского излучения

Выделим следующие параметры регистратора рентгеновского излучения:

- режим регистрации – счётный, интегральный, следует отметить дополнительные варианты счётного режима регистрации – спектрометрический и временная реализация счётного режима;
- тип единичного детектора регистратора – комбинированный детектор, детектор прямого преобразования;
- эффективный атомный номер и плотность материала РЧП первого детектора сэндвича, а также его толщина – Z_L, ρ_L, h_L ;
- эффективный атомный номер и плотность материала промежуточного фильтра сэндвича, а также его толщина – Z_F, ρ_F, h_F ;

- эффективный атомный номер и плотность материала РЧП второго детектора сэндвича, а также его толщина – Z_H, ρ_H, h_H ;
- поперечные размеры фотоприёмника (ФП) для комбинированных детекторов (поперечные размеры единичных детекторов прямого преобразования) – $a_d \times b_d$;
- разрядности АЦП для первого и второго детекторов сэндвича – $k_L; k_H$, для счётного режима регистрации нет необходимости иметь АЦП в структуре измерителя;
- время измерения – t , в единицах времени измерения (миллисекунды, секунды, импульсы);
- $C_{kL}, C_{kH}, C_{kL} > 1, C_{kH} > 1$, – коэффициенты защиты от превышения цифровым сигналом D (ЦС) максимального значения D_{\max} для первого и второго детекторов сэндвича

$$D \leq D_{\max} = 2^k - 1. \quad (2)$$

Пусть центры фронтальных поверхностей РЧП детекторов РРИ принадлежит дуге. Такая модель позволяет максимально упростить необходимые вычисления.

Напомним, что здесь и далее индекс L (**L**aw **E**nergy) соответствует измерениям с «преимущественно мягкой» составляющей рентгеновского излучения, а индекс H (**H**igh **E**nergy) – «преимущественно жёсткой» составляющей рентгеновского излучения.

2.1.3 Объект контроля

Задачей рассматриваемого измерительного прибора является оценка эффективного атомного номера объекта контроля или его структурного фрагмента. Главной характеристикой структурных фрагментов ОК применительно к исследуемой проблеме является обособленность их теней друг от друга на цифровых радиографических изображениях. Заметим также, что структурные фрагменты ОК при просмотре, как правило, имеют достаточно правильные формы.

Из сказанного выше следует, что объект контроля может характеризоваться следующими параметрами:

- диапазоном изменения массовых толщин ρh от $(\rho h)_{\min}$ до $(\rho h)_{\max}$;
- диапазоном изменения эффективных атомных номеров материалов ОК и их фрагментов Z от $(Z)_{\min}$ до $(Z)_{\max}$;
- максимальной линейной толщиной объекта контроля по лучам, соединяющим центр излучающей поверхности и точки детектирования, – H_{\max} ;
- максимальным значением угла между осью пучка и касательной к объекту контроля – φ_0 .

2.1.4 Параметры геометрической схемы сканирования объекта контроля

Часть параметров, связанных с геометрией контроля (сканирования), уже рассмотрены выше, перечислим три дополнительных параметра, к которым относятся:

- расстояние от центра излучающей поверхности до центра регистратора рентгеновского излучения – F ;
- минимальное расстояние от центра излучающей поверхности до объекта контроля – A ;
- минимальное расстояние между дугой РРИ и объектом контроля – R .

При необходимости адаптации разрабатываемой математической модели применительно к конкретной реализации системы цифровой радиографии, инспекционного досмотрового контроля, цифровой линейной томографии, компьютерной томографии первый блок дополняется специфическими параметрами реализуемой системы.

Отметим, что ряд параметров можно заменить одним комплексным параметром. Таким комплексным параметром является число фотонов n_0 , попадающих на фронтальную поверхность единичного РЧП (формирующего один пиксель изображения). Формула для вычисления параметра n_0 имеет вид

$$n_0 = \frac{a_d b_d N_0}{F^2}. \quad (3)$$

Обобщённый параметр n_0 , описываемой формулой (3), заменяет одновременно четыре параметра. Это позволяет существенно упростить имитационное моделирование и анализ систем инспекционного досмотрового

контроля с функцией измерения эффективных атомных номером материалов. В таких ИДК ЭАН используется в качестве параметра распознавания материалов.

Следующий блок является неизменным для всех рентгеновских абсорбционных (трансмиссионных) систем, так как он использует известные базы по взаимодействию гамма-излучения с веществом [40].

2.2 Формирование предварительной информации по ослаблению фотонного излучения с веществом

В большинстве баз данных по ослаблению гамма-излучения с веществом приведены энергетические зависимости сечений взаимодействия $\sigma(E)$ для химических элементов от водорода $Z=1$ до урана $Z=92$. Сечения σ измеряются в барн/атом= 10^{-24} см²/атом. Существуют и библиотеки, в которых представлены зависимости массовых коэффициентов ослабления (МКО) m от энергии E . Формулы связи m и σ имеют вид

$$m(E) = \frac{\sigma(E)N_A}{M}, \quad (4)$$

где N_A – число Авогадро; M – молярная масса.

Энергетические зависимости $\sigma(E)$ для каждого целого значения Z приведены в виде таблиц со полулогарифмической шкалой по энергии с включениями характеристических линий, что весьма неудобно в практическом использовании, так как число строк в таблицах, начиная с некоторого значения атомного номера, является переменной величиной.

На первом этапе блока для каждого Z находятся коэффициенты интерполяции по энергии и вводятся соответствующие непрерывные функции, интерполирующие зависимости $\sigma(E)$.

На втором этапе вводятся непрерывные функции $f(E, E_{\max})$ для описания энергетического спектра ИРИ.

Третий этап посвящён введению функций эффективностей регистрации от энергии для первого и второго детектора сэндвича $\varepsilon_L(E)$ и $\varepsilon_H(E)$.

На четвёртом этапе вводятся функции, описывающие зависимости среднего значения поглощённой энергии зарегистрированного фотона от энергии $E_L(E)$, $E_H(E)$.

2.3 Формирование цифровых радиографических изображений

2.3.1 Формирование виртуальных радиографических изображений

Для лучшего понимания разрабатываемой математической модели допустим некоторый повтор. В анализируемой реализации МДЭ объект облучается пучком рентгеновского излучения с энергетическим спектром $f(E, E_{\max})$, здесь E_{\max} – максимальная энергия излучения. Под энергетическим спектром понимается плотность распределения случайной величины E , которая распределена в интервале от 0 до E_{\max} .

Излучение регистрируется двумя детекторами, которые расположены последовательно друг за другом по направлению распространения рентгеновского излучения [34–36]. Радиационно-чувствительные преобразователи детекторов отделены промежуточным фильтром. Любой материал характеризуется плотностью ρ и эффективным атомным номером Z . Ослабление (регистрация) излучения помимо плотности и атомного номера определяется толщиной материала H . Произведение ρH плотности материала ОК ρ на его толщину H называют массовой толщиной [38, 39, 41].

Напомним, что индекс L соотносится с «преимущественно мягкой» составляющей рентгеновского излучения и первым детектором, H – с «преимущественно жёсткой» составляющей и вторым детектором; F – с промежуточным фильтром.

Как выше уже подчёркнуто, сэндвич-детектор – слоёный детектор характеризуется тремя наборами пар параметров: первый детектор – $(\rho_L h_L, Z_L)$; промежуточный фильтр – $(\rho_F h_F, Z_F)$; второй детектор – $(\rho_H h_H, Z_H)$.

Уравнения связи параметров объекта контроля $(\rho h, Z)$ с аналоговыми сигналами (АС) с детекторов за ОК I_L , I_H применительно к анализируемой реализации МДЭ с точностью до коэффициентов преобразования энергии C_L и C_H записываются следующим образом

$$I_L(\rho H, Z) = n_0 C_L \int_0^{E_{\max}} E_L(E) f(E, E_{\max}) e^{-m(E, Z) \rho H} \varepsilon_L(E) \nu_L(E) dE$$

$$I_H(\rho H, Z) = n_0 C_H \int_0^{E_{\max}} E_H(E) f^*(E, E_{\max}) e^{-m(E, Z) \rho H} \varepsilon_H(E) \nu_H(E) dE$$
(5)

Вспомогательная функция, характеризующая ослабление в РЧП первого детектора сэндвича и в материале предварительного фильтра, имеет вид

$$f^*(E, E_{\max}) = f(E, E_{\max}) e^{-m_L(E, Z_L) \rho_L h_L - m_F(E, Z_F) \rho_F h_F}. \quad (6)$$

В системе (5) $E_L(E)$, $E_H(E)$ – энергетические зависимости среднего значения энергии зарегистрированного фотона в первом и во втором детекторах сэндвича; $\varepsilon_L(E)$, $\varepsilon_H(E)$ – энергетические зависимости эффективности регистрации для первого и второго детектора сэндвича; $\nu_L(E)$, $\nu_H(E)$ – энергетические зависимости эффективности светосбора для первого и второго детектора сэндвича; $m(E, Z)$ – энергетическая зависимость массового коэффициента ослабления (МКО) рентгеновского излучения материалом с эффективным атомным номером Z .

Функции $E_L(E)$, $E_H(E)$ и $\varepsilon_L(E)$, $\varepsilon_H(E)$ зависят не только от толщины РЧО в направлении просвечивания, но и от его поперечных размеров [42], что связано с переносом энергии вторичными фотонами и электронами. Для диапазона максимальных энергий рентгеновского излучения $E_{\max} < 160$ кэВ, характерных для досмотровых систем багажа и ручной клади, в первом приближении можно принять $E_L(E) \approx E_H(E) \approx E$. Энергетические зависимости $\varepsilon_L(E)$, $\varepsilon_H(E)$ в соответствии с законом Бэра-Ламберта в первом приближении описываются известными выражениями

$$\varepsilon_L(E) = 1 - e^{-m(E, Z_L) \rho_L h_L}$$

$$\varepsilon_H(E) = 1 - e^{-m(E, Z_H) \rho_H h_H}.$$
(7)

Для больших значений E_{\max} необходимо использовать подходы к оценке $E_L(E)$, $E_H(E)$, предложенные в работах [42, 43].

Энергетические зависимости эффективности светосбора $\nu_L(E)$, $\nu_H(E)$ определяются размерами РЧО и взаимным расположением фотодетекторов и РЧО [44]. В работе [45] отмечено, что на сигналы с радиометрических детекторов с большой толщиной РЧО существенно влияет эффективность светосбора. При

увеличении толщины РЧО происходит ухудшение пространственного разрешения, которое компенсируется оптическим обособлением элементарных объёмов [45]. Учёт вышеуказанных факторов необходим при проектировании детекторов систем досмотрового контроля на основе рассматриваемой реализации МДЭ.

Для калибровки по «белому», то есть для устранения различий между детекторами РИ по коэффициентам передачи энергии, необходимы оценки аналоговых сигналов без ОК I_{0L} , I_{0H} , который выводятся из (5)

$$\begin{aligned} I_{0L} &= I_L(0,13) \\ I_{0H} &= I_H(0,13) \end{aligned} \quad (8)$$

Отметим, что в качестве материала может быть выбран любой химический элемент, результат будет неизменным.

Выражения (5)–(8) предназначены для теоретического анализа рассматриваемого типа ИДК с функцией оценки эффективного атомного номера. Эти выражения также позволяют оценить виртуальные изображения I_L , I_H . Виртуальность изображений заключается в отсутствии возможности увидеть их непосредственно. В случае РРИ на основе панелей из сцинтилляторов монокристаллов или поликристаллических экранов такая возможность всё же есть, ограничение связано с возможностями человеческого глаза видеть световые потоки малой интенсивности. Для РРИ с преобразователями прямого действия это однозначно невозможно, так как человек не приспособлен видеть поля электрических зарядов. Аналоговые сигналы необходимо преобразовать в цифровые сигналы.

2.3.1 Трансформация виртуальных изображений в цифровые радиографические изображения

На вход аналого-цифровых преобразователей поступают совокупность аналоговых сигналов I_L , I_H и I_{0L} , I_{0H} , где они подвергаются преобразованию в цифровые сигналы D_L , D_H и D_{0L} , D_{0H} . Формулы для указанного преобразования имеют вид

$$\begin{aligned} D_L &= \left[\frac{I_L}{\Delta_L} \right] & D_{0L} &= \left[\frac{I_{0L}}{\Delta_{0L}} \right] & \Delta_{0L} &= \frac{C_{kL} \max I_{0L}}{2^{k_L} - 1} \\ D_H &= \left[\frac{I_H}{\Delta_H} \right] & D_{0H} &= \left[\frac{I_{0H}}{\Delta_{0H}} \right] & \Delta_{0H} &= \frac{C_{kH} \max I_{0H}}{2^{k_H} - 1} \end{aligned} \quad (9)$$

Зависимости $I_L(\rho H)$, $I_H(\rho H)$ и, следовательно, $D_L(\rho H)$ и $D_H(\rho H)$ близки к экспоненциальным функциям, поэтому их анализ и визуализация изображений \mathbf{I}_L , \mathbf{I}_H (\mathbf{D}_L , \mathbf{D}_H) сопряжены с определёнными сложностями. Поэтому цифровые сигналы изображений \mathbf{D}_L , \mathbf{D}_H вначале калибруют, а затем логарифмируют. Соответствующие преобразования описываются формулами

$$\begin{aligned} T_L(\rho H, Z) &= -\ln \frac{D_L(\rho H, Z)}{D_{0L}} = y_L \\ T_H(\rho H, Z) &= -\ln \frac{D_H(\rho H, Z)}{D_{0H}} = y_H \end{aligned} \quad (10)$$

В системе (10) величины y_L и y_H имеют строго определённое физическое толкование. Они представляют собой оценки толщин ОК для мягкой и жёсткой областей энергетического спектра рентгеновского излучения. Эти оценки выражены в единицах длин свободного пробега (д.с.п.) Преобразование (10) позволяет уменьшить влияние экспоненциального спада радиационных прозрачностей с ростом массовой толщины ОК на точность оценки ρH и Z . Второй фактор целесообразности трансформации (10) связан с упрощением физической интерпретации алгоритмов оценки ρH и Z .

Правые части системы уравнений (10) определяются на стадии экспериментов либо расчётов. Их можно трактовать как экспериментальные либо расчётные оценки толщин ОК y_L и y_H для «преимущественно мягкой» и «преимущественно жёсткой» составляющих рентгеновского излучения.

Функции $T_L(\rho H, Z)$ и $T_H(\rho H, Z)$ могут оцениваться расчётным путём (совокупность формул (5)–(10) либо на стадии калибровочных измерений при просвечивании специальным образом организованного тестового объекта (ТО) с фрагментами, отличающимися друг от друга по массовой толщине ρH и эффективному атомному номеру Z .

Явное описание функций $T_L(\rho H, Z)$ и $T_H(\rho H, Z)$ в совокупности выражений (1)–(10) позволяет проанализировать влияние каждого из параметров рассматриваемой системы досмотрового контроля с функцией распознавания материалов на качество её (системы) функционирования.

Решение системы (10) относительно неизвестной Z называется экспериментальной оценкой эффективного атомного номера Z_{eff} .

Система (10) является уравнением измерителя эффективного атомного номера в рассматриваемой реализации метода дуальных энергий, основанной на оценке ослабления «преимущественно мягкого» и «преимущественно жёсткого» рентгеновского излучения детекторами сэндвича.

Отметим, что система (10) позволяет одновременно оценить и массовую толщину ОК ρH .

Продemonстрируем вопросы метрологического характера и сложности, которые возникают на практике при решении системы (10).

3 Анализ системы уравнений для измерителя эффективного атомного номера методом дуальных энергий

3.1 Существование и единственность решения для системы уравнений измерителя эффективного атомного номера методом дуальных энергий

Совокупность выражений (10) представляет собой систему уравнений (обобщённое уравнение) измерителя эффективной массовой толщины ρH и эффективного атомного номера Z_{eff} . Логично выдвинуть ряд требований к системе уравнений (10). Такими требованиями является существование и единственность решения на всей области потребительского интереса \mathbf{PZ} , которая описана в предыдущем разделе.

Отмеченная область потребительского интереса \mathbf{PZ} вводится следующим образом

$$\mathbf{PZ} = \{(\rho h, Z) : (\rho h)_{\min} \leq \rho h \leq (\rho h)_{\max}; Z_{\min} \leq Z \leq Z_{\max}\}, \quad (11)$$

где $(\rho h)_{\min}$, $(\rho h)_{\max}$, Z_{\min} , Z_{\max} – минимальные и максимальные значения массовой толщины ОК и эффективного атомного номера материала ОК.

Известны несколько различных подходов, позволяющих доказать существование и единственность решения системы (10) относительно переменных Z и ρh .

Якобиан. Решение системы уравнений вида (10) на области потребительского интереса \mathbf{PZ} (11) существует и является единственным, если для каждой точки из области интереса (формальная зависимость – $(\rho h, Z) \in \mathbf{PZ}$) выполняется условие [46, 47] неравенства определителя матрицы Якоби $\det J$ (якобиана) нулю

$$\det J = \begin{vmatrix} \frac{\partial T_L(\rho h, Z)}{\partial(\rho h)} & \frac{\partial T_L(\rho h, Z)}{\partial Z} \\ \frac{\partial T_H(\rho h, Z)}{\partial(\rho h)} & \frac{\partial T_H(\rho h, Z)}{\partial Z} \end{vmatrix} \neq 0. \quad (12)$$

Очевидно, что неравенство (12) применимо для анализа системы уравнений (10) в том случае, если калибровочные функции $T_L(\rho h, Z)$ и $T_H(\rho h, Z)$ и их производные являются одновременно непрерывными и гладкими на всей области

определения (области потребительского интереса \mathbf{PZ}) (11). Сформулированное выше ограничение требует проверки.

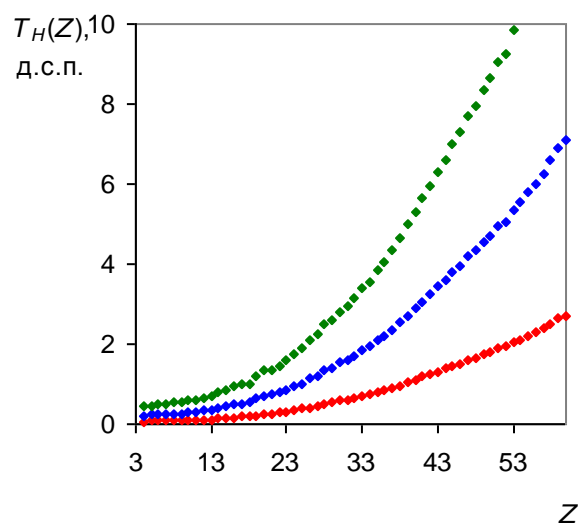
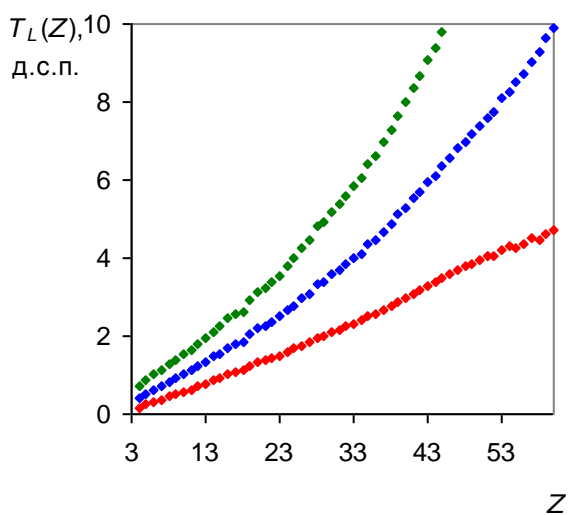
Приведём пример расчёта зависимостей $T_L(\rho h, Z)$ и $T_H(\rho h, Z)$ для целочисленных значений атомного номера Z от 3 (литий) до 60 (неодим). Расчёты проводили для значений максимальных значение рентгеновского излучения $E_{\max} \in \{100 \text{ кэВ}; 120 \text{ кэВ}; 160 \text{ кэВ}\}$ и значений массовых толщин $\rho h \in \{0,5 \text{ г/см}^2; 1,5 \text{ г/см}^2; 3 \text{ г/см}^2\}$. Материал РЧП первого детектора – сцинтилляционная керамика $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ (GOS), толщина – $h_L=0,5$ мм, материал РЧП второго детектора – монокристаллы CsI, толщина 8 мм, промежуточный фильтр – из меди толщиной $h_F=0,5$ мм. Отметим, что условия для расчётов схожи с условиями из работ [32, 34–36].

На рисунке 2 приведены зависимости $T_L(\rho h, Z)$ и $T_H(\rho h, Z)$ для исследуемых уровней массовой толщины ρh и максимальных энергий E_{\max} .

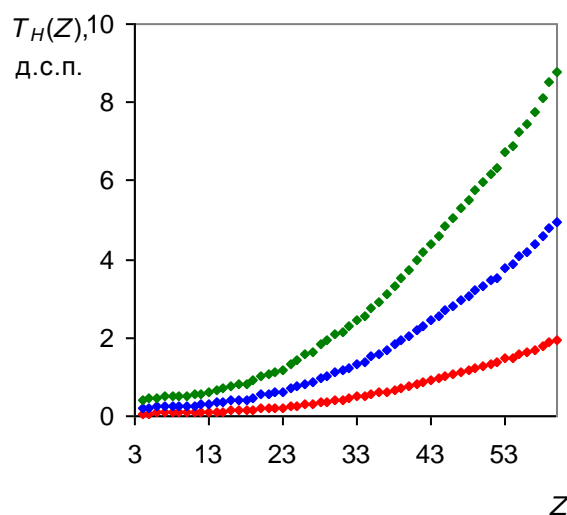
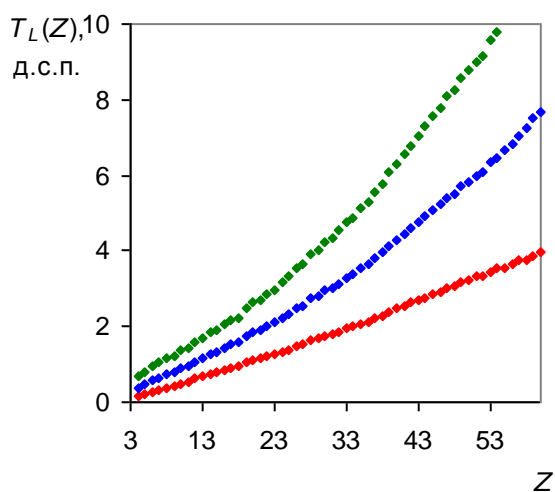
Анализ графиков, приведённых на рисунке 2, не позволяет сделать вывод о недостаточной гладкости зависимостей $T_L(Z)$ и $T_H(Z)$ для рассматриваемых уровней ρh и E_{\max} . Недостаточная гладкость исследуемых функций от Z является ярко выраженной и препятствует оценке эффективного атомного номера с высокой точностью.

Из вышеуказанного вывода вытекает необходимость использования в качестве калибровочных функций $T_L(\rho h, Z)$ и $T_H(\rho h, Z)$ для системы (10) не интерполяционных функций, а аппроксимаций. Разумеется, это приводит к появлению соответствующей систематической погрешности измерителя эффективного атомного номера Z_{eff} . Положительным моментом применения гладких аппроксимаций является получение однозначных оценок искомой величины (величин) и принципиальная возможность анализа чувствительности способа измерения Z_{eff} .

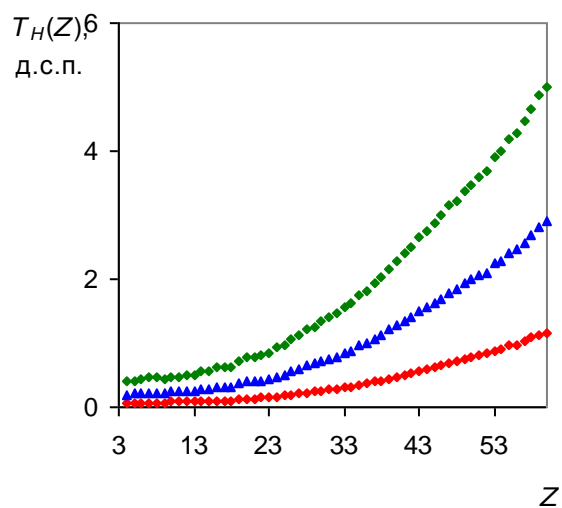
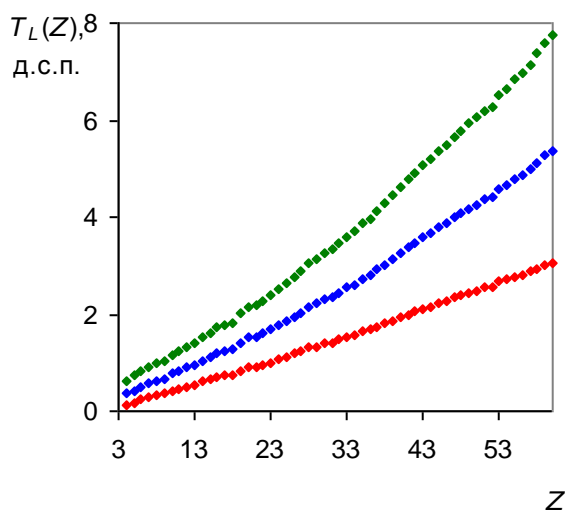
Условие (12) достаточно просто проверяется при обработке расчётных или экспериментальных данных, но является сложным в практической интерпретации, причём сложность заключается в установлении предельного значения $\det J$, для которого можно предполагать существование и единственность корней системы (10).



$E_{\max}=100$ кэВ



$E_{\max}=120$ кэВ



$E_{\max}=160$ кэВ

Рисунок 2. Зависимости $T_L(Z)$ и $T_H(Z)$:

♦ – $\rho h=0,5$ г/см²; ♦ – $\rho h=1,5$ г/см²; ♦ – $\rho h=3$ г/см²

Отметим, что отмеченная выше сложность определяется большим числом характеристик системы распознавания материалов, от которых зависит значение

степень близости определителя матрицы Якоби $\det J$ к нулю. К таким характеристикам относятся:

- параметры ОК – ρh и Z ;
- максимальная энергия рентгеновского излучения E_{\max} и его энергетический спектр;
- параметры первого детектора $\rho_L h_L, Z_L$;
- параметры промежуточного фильтра $\rho_F h_F, Z_F$;
- параметры второго детектора $\rho_H h_H, Z_H$.

Число обусловленности. Помимо условия (12) существует условие с ограничениями на число обусловленности матрицы Якоби – $\text{cond} J$. Эта характеристика является мерой устойчивости системы (10) к шумам в правой части [32, 49–50].

Во всех языках высокого уровня и системах математических вычислений, например, в MathCad [51, 52] существуют подпрограммы для оценки чисел обусловленности. В системе MathCad имеется несколько подпрограмм-функций для оценки чисел обусловленности: $\text{cond1}(\mathbf{A})$; $\text{cond2}(\mathbf{A})$; $\text{conde}(\mathbf{A})$; $\text{condi}(\mathbf{A})$. Здесь \mathbf{A} – квадратная матрица.

Метод возмущений. Ещё одним подходом, позволяющим доказать или опровергнуть существование и единственность решения системы (10) относительно неизвестной Z является метод возмущений [32, 53]. Применительно к поставленной задаче метод возмущений сводится к определению смещения эффективного атомного номера – ΔZ_{eff} , вызванного изменением параметра ОК от Z до ΔZ . Отсюда следует, что метод возмущений представляет собой способ анализа чувствительности исследуемой измерительной системы.

Для анализа чувствительности рассматриваемого метода распознавания материалов ОК и их структурных фрагментов воспользуемся способом малых приращений. Из системы (10) получим в обобщённом виде уравнения, связывающие малые приращения оценок толщин ОК ΔT_L и ΔT_H в д.с.п. с малыми приращениями эффективной массовой толщины $\Delta(\rho h)_{\text{eff}}$ и эффективного атомного номера ΔZ_{eff} .

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_L(\rho h, Z)}{\partial(\rho h)} \Delta(\rho h)_{\text{eff}} + \frac{\partial T_L(\rho h, Z)}{\partial Z} \Delta Z_{\text{eff}} &= \Delta d_L \\ \frac{\partial T_H(\rho h, Z)}{\partial(\rho h)} \Delta(\rho h)_{\text{eff}} + \frac{\partial T_H(\rho h, Z)}{\partial Z} \Delta Z_{\text{eff}} &= \Delta d_H. \end{aligned} \quad (13)$$

Из системы (13) найдём приращение ΔZ

$$\Delta Z_{\text{eff}} = \frac{\frac{\partial T_L(\rho h, Z)}{\partial(\rho h)} \Delta T_H - \frac{\partial T_H(\rho h, Z)}{\partial(\rho h)} \Delta T_L}{\det J}. \quad (14)$$

Приращения толщин $\Delta T_L(\rho h, Z, \Delta Z)$ и $\Delta T_H(\rho h, Z, \Delta Z)$, вызванные отклонением атомного номера материала ОК от Z до $Z + \Delta Z$, находятся из выражения (10). Соответствующие формулы имеют вид

$$\begin{aligned} \Delta T_L(\rho h, Z, \Delta Z) &= T_L(\rho h, Z + \Delta Z) - T_L(\rho h, Z) \\ \Delta T_H(\rho h, Z, \Delta Z) &= T_H(\rho h, Z + \Delta Z) - T_H(\rho h, Z). \end{aligned} \quad (15)$$

Уравнение (14) в совокупности с формулами (15) является основой для анализа чувствительности метода оценки эффективного атомного номера с помощью не только рассматриваемой, но и любых других реализаций МДЭ с использованием соответствующих экспериментальных или расчетных зависимостей $T_L(\rho h, Z)$ и $T_H(\rho h, Z)$.

Подчеркнём, что с потребительской точки зрения система измерения не позволяет оценивать ΔZ_{eff} с высокой точностью, если $\Delta Z_{\text{eff}}/\Delta Z \ll 1$ – малая чувствительность к изменению Z или $\Delta Z_{\text{eff}}/\Delta Z \gg 1$ – гиперчувствительность к изменению Z .

3.2 Расчёт якобиана, числа обусловленности для системы (10) и смещения оценки эффективного атомного номера

Для сравнения различных подходов к исследованию системы (10) был проведён расчёт зависимостей $\det J(\rho h, Z)$, $\text{cond} J(\rho h, Z)$, $\Delta Z_{\text{eff}}(\rho h, Z, \Delta Z=1)$ для условий приведённого выше примера. На рисунке 3 приведены графики анализируемых зависимостей.

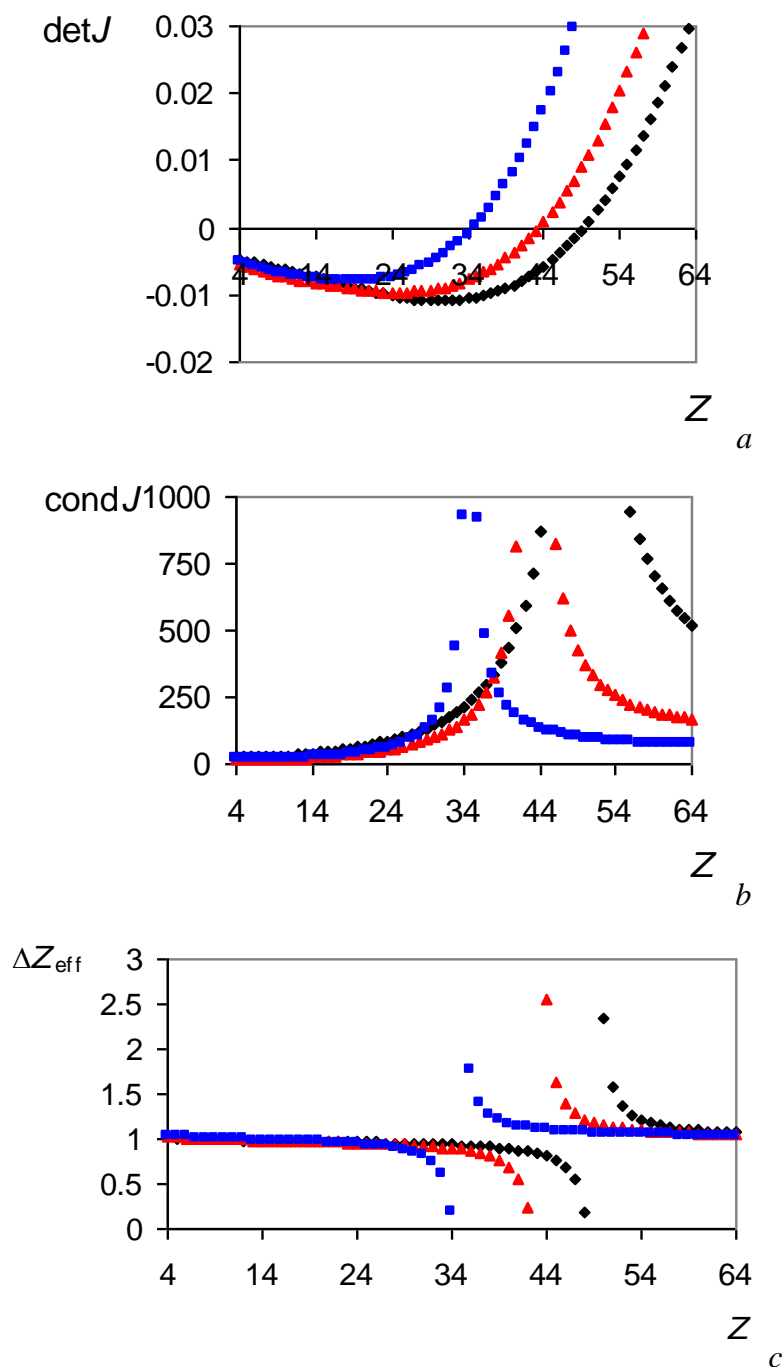


Рисунок 3. Зависимости $\det J(Z) - a$, $\text{cond} J(Z) - b$, $\Delta Z_{\text{eff}}(Z)$, $\Delta Z=1 - c$, $E_{\text{max}}=140$ кэВ:
 $\blacklozenge - \rho H=1$ г/см²; $\color{red}\blacklozenge - \rho H=3$ г/см²; $\color{blue}\blacklozenge - \rho H=5$ г/см²

В расчётах были использована библиотека по взаимодействию гамма-излучения с веществом [53]. Для описания энергетического спектра источника рентгеновского излучения применялась формула Крамерса [54] с её модификациями [55]. Расчёты проводились для описанных выше условий.

Совместный анализ графиков, приведённых на рисунке 3, позволяет сделать важный вывод: подход на основе анализа возмущений наиболее эффективен для исследования системы (10). Поэтому для анализа чувствительности способа измерения эффективного атомного номера,

базирующегося на рассматриваемой реализации метода дуальных энергий будет использован именно этот подход.

Из анализа зависимости $\Delta Z_{\text{eff}}(\rho h, Z, \Delta Z=1)$ можно сделать вывод о возможности измерения эффективного атомного номера материала ОК с точностью 1 единица эффективного атомного номера одно-энергетическим методом дуальных энергий в диапазоне Z от 4 до 46 для $\rho h=1$ г/см², при Z от 4 до 40 для $\rho h=3$ г/см², при Z от 4 до 32 для $\rho h=5$ г/см².

Ниже рассмотрим влияние параметров системы досмотрового контроля на характер зависимости $\Delta Z_{\text{eff}}(\rho h, Z, \Delta Z)$ и описанный выше диапазон.

3.3 Влияние параметров системы досмотрового контроля на зависимость $\Delta Z_{\text{eff}}(Z)$

Исследуем влияние основных параметров анализируемой системы на её чувствительность к изменению эффективного атомного номера ОК. Для этого используем уравнения (1), (2), (6), (7) с фиксированным значением изменения атомного номера ОК, например, $\Delta Z=1$.

3.3.1 Влияние максимальной энергии рентгеновского излучения E_{max} на зависимость $\Delta Z_{\text{eff}}(Z)$

На первом этапе исследуем влияние максимальной энергии рентгеновского излучения E_{max} на зависимость $\Delta Z_{\text{eff}}(Z)$ для $\Delta Z=1$. На рисунке 4 приведены анализируемые зависимости $\Delta Z_{\text{eff}}(Z)$ для Z из диапазона от 4 до 63 для максимальных энергий рентгеновского излучения E_{max} – 80 кэВ, 100 кэВ, 120 кэВ, 140 кэВ и 160 кэВ.

Анализ данных, приведённых на рисунке 4, для $E_{\text{max}} \geq 100$ кэВ позволяет сделать вывод о существовании диапазона эффективных атомных номеров ($Z_{\text{min}}, Z_{\text{max}}$), для которого $|\Delta Z_{\text{eff}}/\Delta Z| \gg 1$. Наличие такого диапазона существенно ограничивает область применения способа измерения эффективного атомного номера одно-энергетическим методом дуальных энергий. Так для $E_{\text{max}} = 160$ кэВ значение $|\Delta Z_{\text{eff}}/\Delta Z| \approx 1$ для Z от 4 до 40.

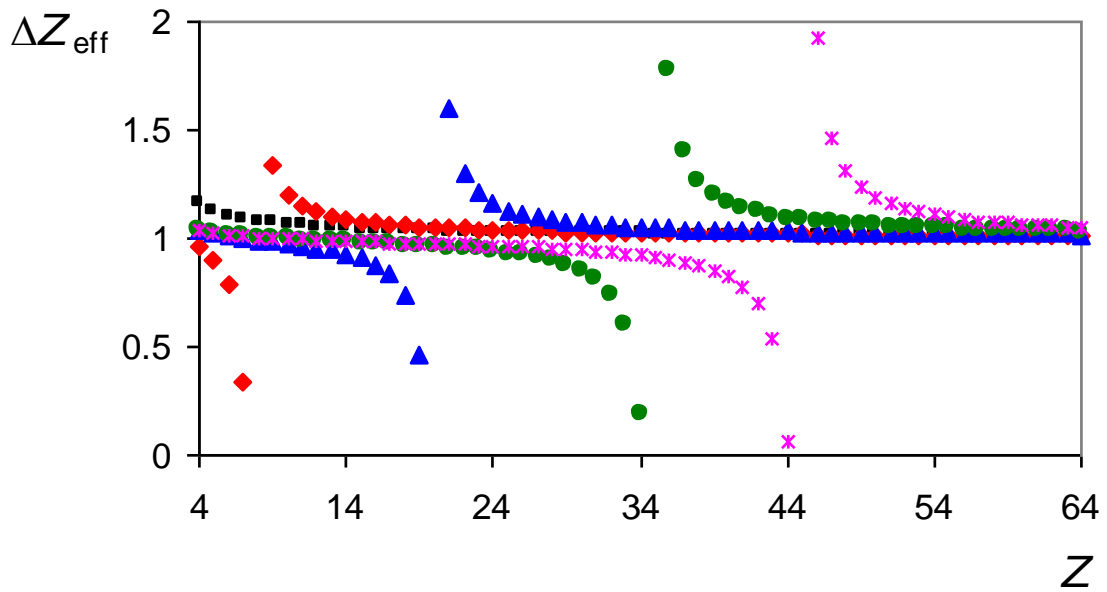


Рисунок 4. Зависимости $\Delta Z_{\text{eff}}(Z)$, $\Delta Z=1$, $\rho H=5$ г/см²:
 ■ – $E_{\text{max}}=80$ кэВ; ♦ – $E_{\text{max}}=100$ кэВ; ▲ – $E_{\text{max}}=120$ кэВ; ● – $E_{\text{max}}=140$ кэВ; * – $E_{\text{max}}=160$ кэВ

3.3.2 Влияние толщины h_L радиационно-чувствительного преобразователя первого детектора сэндвича на зависимость $\Delta Z_{\text{eff}}(Z)$

На втором этапе исследований была проведена серия расчётов зависимости $\Delta Z_{\text{eff}}(\rho h, Z, \Delta Z)$, для $\Delta Z = 1$, $E_{\text{max}} = 160$ кэВ, $h_F = 0,5$ мм и толщин РЧП первого детектора сэндвича из оксисульфида гадолиния (сцинтилляционная керамика Gd_2SO_2) $h_L \in \{0,1 \text{ мм}; 0,2 \text{ мм}; 0,5 \text{ мм}; 2 \text{ мм}\}$. Результаты расчётов представлены на рисунке 5.

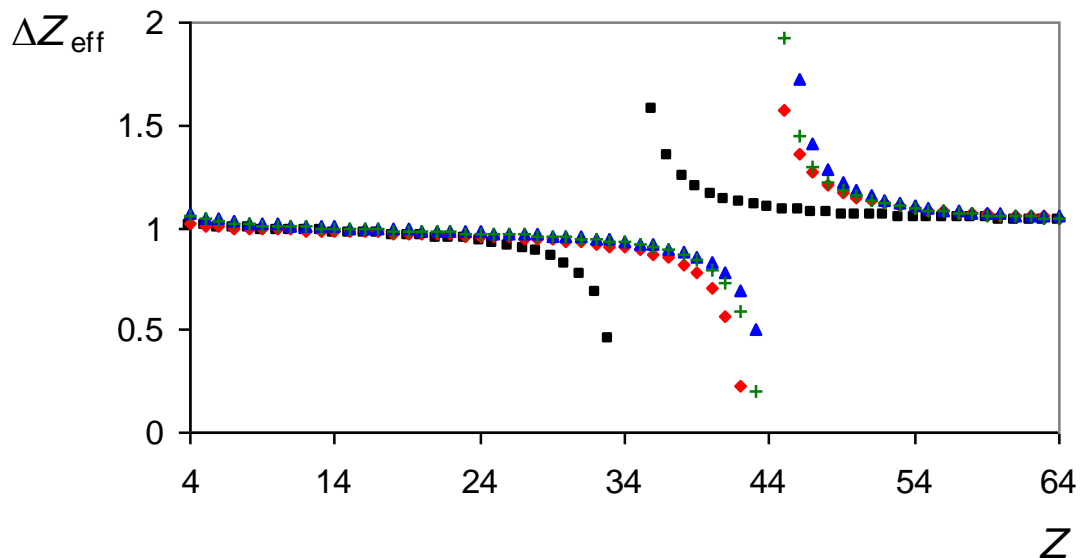


Рисунок 5. Зависимости $\Delta Z_{\text{eff}}(Z)$, $\Delta Z=1$, $\rho H=5$ г/см², $E_{\text{max}}=160$ кэВ, $h_F=0,5$ мм:
 ■ – $h_L=0,1$ мм; ♦ – $h_L=0,2$ мм; ▲ – $h_L=0,5$ мм; + – $h_L=2$ мм

Сравнение результатов расчётов показало, что с возрастанием толщины РЧП первого детектора h_L разрыв зависимости $\Delta Z_{\text{eff}}(Z)$ смещается в сторону увеличения соответствующих значений атомного номера, причём, начиная с некоторого значения, смещение становится незначимым. С точки зрения чувствительности метода измерения Z_{eff} представляется целесообразным выбрать толщину РЧП первого детектора h_L из диапазона от 0,2 мм до 0,5 мм.

3.3.3 Влияние толщины h_F промежуточного фильтра сэндвича на зависимость $\Delta Z_{\text{eff}}(Z)$

Ожидается, что применение промежуточного фильтра между РЧП сэндвича приводит к ужесточению пучка рентгеновского излучения, попадающего на РЧП второго детектора. Это приводит к лучшему разделению рентгеновского излучения на «преимущественно мягкую» и «преимущественно жёсткую» составляющие. На следующем этапе варьировалась толщина промежуточного фильтра сэндвича. В качестве материала фильтра была выбрана медь. Вычисления проводились для $h_F \in \{0,1 \text{ мм}; 0,5 \text{ мм}; 1 \text{ мм}; 1,5 \text{ мм}\}$, $\Delta Z = 1$, $E_{\text{max}} = 160 \text{ кэВ}$ и толщины первого детектора из оксида гадолиния $h_L = 0,05 \text{ мм}$. Результаты расчётов приведены на рисунке 6.

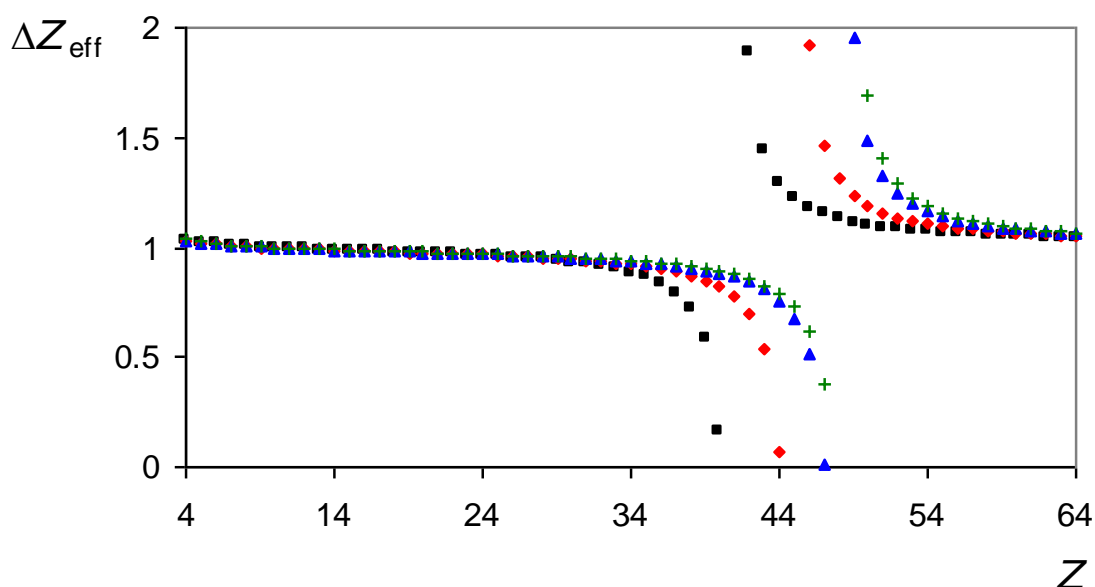


Рисунок 6. Зависимости $\Delta Z_{\text{eff}}(Z)$, $\Delta Z = 1$, $\rho H = 5 \text{ г/см}^2$, $E_{\text{max}} = 160 \text{ кэВ}$, $h_L = 0,5 \text{ мм}$:

■ – $h_F = 0,1 \text{ мм}$; ♦ – $h_F = 0,5 \text{ мм}$; ▲ – $h_F = 1 \text{ мм}$; + – $h_F = 1,5 \text{ мм}$

Анализ результатов расчётов показал аналогичное поведение смещения разрыва функции $\Delta Z_{\text{eff}}(Z)$ с увеличением толщины промежуточного фильтра сэндвича. Целесообразно осуществить выбор толщины промежуточного фильтра из меди h_F из диапазона от 0,5 мм до 1,5 мм.

3.3.3 Влияние толщины h_H радиационно-чувствительного преобразователя второго детектора сэндвича на зависимость $\Delta Z_{\text{eff}}(Z)$

Ещё одним параметром, влияние которого на зависимость $\Delta Z_{\text{eff}}(Z)$ необходимо проверить, является толщина РЧП второго детектора. В расчётах толщина РЧП второго детектора принимала значения $h_H \in \{5 \text{ мм}; 10 \text{ мм}; 25 \text{ мм}\}$, $h_F=1 \text{ мм}$, $\Delta Z=1$, $E_{\text{max}}=160 \text{ кэВ}$, $h_L=0,05 \text{ мм}$.

На рисунке 7 приведены результаты соответствующих расчётов.

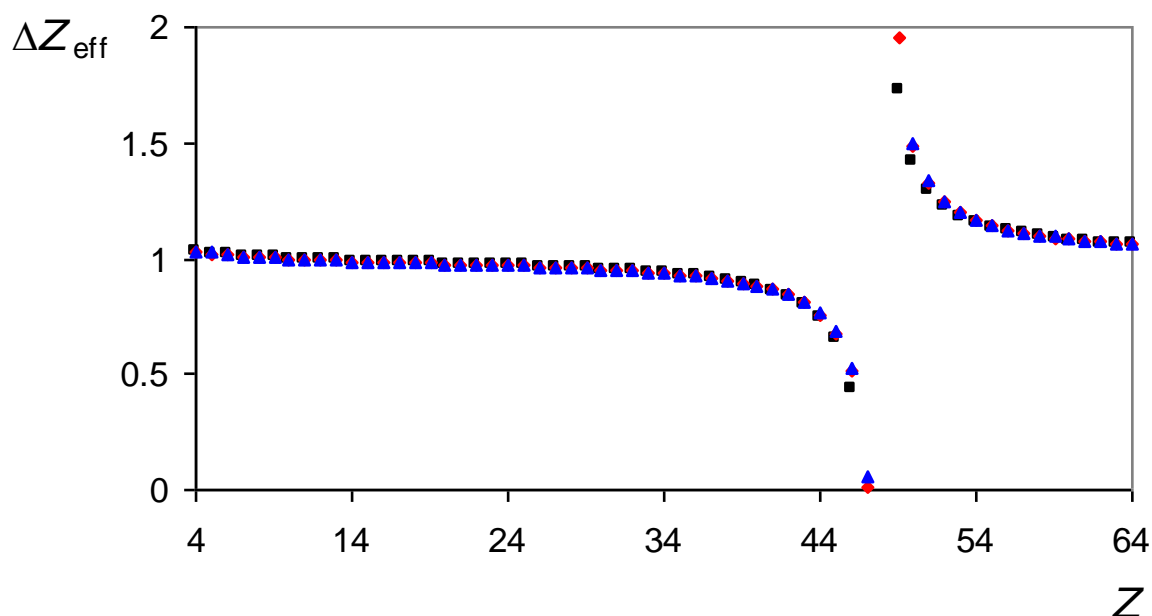


Рисунок 7. Зависимости $\Delta Z_{\text{eff}}(Z)$, $\Delta Z=1$, $\rho H=5 \text{ г/см}^2$, $E_{\text{max}}=160 \text{ кэВ}$, $h_L=0,05 \text{ мм}$, $h_F=1 \text{ мм}$:
 — $h_H=5 \text{ мм}$; — $h_H=10 \text{ мм}$; — $h_H=20 \text{ мм}$

Данные, приведённые на рисунке 7, свидетельствуют о практической независимости функций $\Delta Z_{\text{eff}}(Z)$ от толщин вторых детекторов. Отметим, что этот вывод является ожидаемым, но с единственной оговоркой – начиная с некоторой толщины.

Из вышеизложенного можно сделать следующий значимый вывод: рассматриваемая система измерения эффективного атомного номера является недостаточно устойчивой к изменению собственных параметров. Исключением

является толщина радиационно-чувствительного преобразователя второго детектора сэндвича из CsI, изменение её в диапазоне от 5 мм до 20 мм не приводит к заметному уменьшению диапазона атомных номеров потребительского интереса. Дальнейшее увеличение толщины радиационно-чувствительного преобразователя второго детектора сэндвича нецелесообразно по причине уменьшения коэффициента собирания света, а также по технологическим и экономическим соображениям.

Приведённые выше результаты иллюстрируют подход к анализу способа измерения эффективного атомного номера одно-энергетическим методом дуальных энергий. Этот подход основан на совместном теоретическом исследовании калибровочных функций $T_L(\rho h, Z)$ и $T_H(\rho h, Z)$ и позволяет осуществить рациональный выбор базовых параметров описываемого способа. Экспериментальное исследование является излишне затратным.

Помимо систематической погрешности и чувствительности любая система измерений характеризуется связью шумов исходных данных и оцениваемых параметров объекта контроля. Указанная связь определяет статистическую погрешность оценки эффективного атомного номера. Поэтому исследование этой связи является составной частью метрологического обеспечения рассматриваемого способа измерения ЭАН.

Ниже приведём оценки систематической и статистической составляющей погрешности измерения Z_{eff} применительно к анализируемому методу измерения ЭАН.

4 Оценка точности измерения эффективного атомного номера одно-энергетическим методом дуальных энергий

4.1 Оценка систематической погрешности измерения эффективного атомного номера

Из анализа системы уравнений (10) и формулы (1) можно сделать вывод о гладкости калибровочных функций $T_L(\rho h, Z)$ и $T_H(\rho h, Z)$ относительно переменной ρh для любого значения эффективного атомного номера Z_{eff} . Выше подчёркнуто, что данные, приведённые на рисунке 1, свидетельствуют о недостаточной гладкости $T_L(\rho h, Z)$ и $T_H(\rho h, Z)$ относительно атомного номера Z . Применение гладких функций для аппроксимации расчётных или экспериментальных зависимостей обуславливает появление соответствующей систематической погрешности. Величина такой погрешности зависит от используемых аппроксимаций.

В расчётах предыдущего раздела использовался подход, основанный на последовательной аппроксимации функций $T_L(\rho h, Z)$ и $T_H(\rho h, Z)$ вначале по атомному номеру Z , а затем по массовой толщине ρh .

В общем виде аппроксимации калибровочных функций $T_L(\rho h, Z)$ и $T_H(\rho h, Z)$ описываются выражениями

$$\begin{aligned} T_L(\rho h, Z) &\approx a_L(\rho h)Z^{b_L(\rho h)} + c_L(\rho h) \\ T_H(\rho h, Z) &\approx a_H(\rho h)Z^{b_H(\rho h)} + c_H(\rho h) \end{aligned} \quad (16)$$

Представление зависимостей $T_L(\rho h, Z)$ и $T_H(\rho h, Z)$ от Z в виде (16) связано с тем, что для любой энергии фотонов из диапазона от 50 кэВ до 450 кэВ массовый коэффициент ослабления гамма-излучения равен сумме массовых коэффициентов ослабления парциальных эффектов взаимодействия – фотоэффекта, эффекта Релея и эффекта Комптона.

Гладкость калибровочных функций $T_L(\rho h, Z)$ и $T_H(\rho h, Z)$ от ρh делает допустимым применение полиномиальной регрессии k -ой степени (традиционно рекомендуется придерживаться ограничения $k \leq 5$) для описания двух троек зависимостей $\{a_L(\rho h), b_L(\rho h), c_L(\rho h)\}$ и $\{a_H(\rho h), b_H(\rho h), c_H(\rho h)\}$.

Для оценки систематической погрешности измерения $Z_{\text{eff}} - \Delta_{\text{sys}}Z_{\text{eff}}(\rho h, Z)$ была проведена серия расчётов зависимостей $Z_{\text{eff}}(\rho h, Z)$ для максимальной энергии рентгеновского излучения $E_{\text{max}} = 160$ кэВ, толщины РЧП первого детектора сэндвича $h_L = 0,05$ мм ($\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$), толщины РЧП второго детектора сэндвича $h_H = 10$ (CsI), толщины промежуточного фильтра $h_F = 0,5$ мм (Cu). Массовая толщина объекта контроля изменялась в диапазоне от 1 г/см² до 5 г/см², а атомный номер материала ОК от 5 (бор) до 29 (медь).

Для иллюстрации на рисунке 8 приведены несколько графиков зависимости $\Delta_{\text{sys}}Z_{\text{eff}}(\rho h, Z)$ для фиксированных значений ρh .

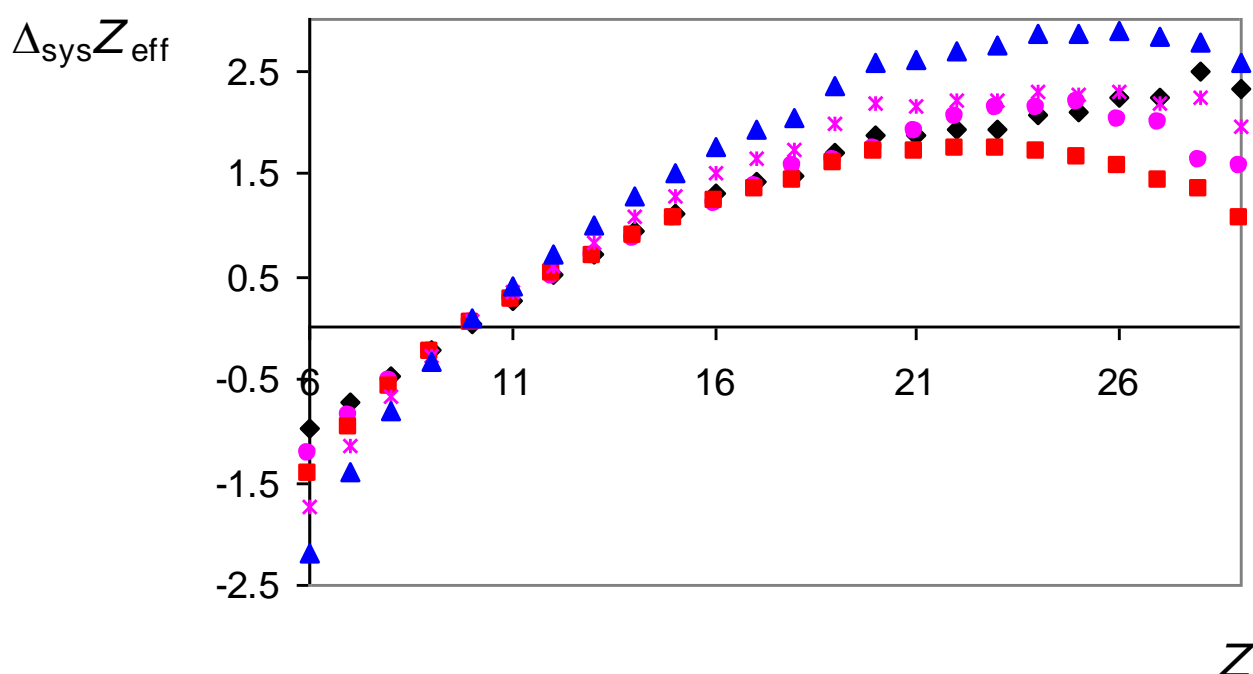


Рисунок 8. Зависимости $\Delta_{\text{sys}}Z_{\text{eff}}(Z)$, $\rho H = 5$ г/см², $E_{\text{max}} = 160$ кэВ, $h_L = 0,5$ мм, $h_F = 0,5$ мм:
 ♦ – $\rho h = 1$ г/см²; ● – $\rho h = 2$ г/см²; ■ – $\rho h = 3$ г/см²; * – $\rho h = 4$ г/см²; ▲ – $\rho h = 5$ г/см²

Общий характер зависимостей $\Delta_{\text{sys}}Z_{\text{eff}}(\rho h, Z)$ схож для исследуемого диапазона массовых толщин ρH . Этот факт позволяет провести дополнительную калибровку, сводящуюся к умножению на изменяющийся по Z поправочный коэффициент (поправочную функцию). Описанная калибровка уменьшает систематическую погрешность измерения $Z_{\text{eff}} - \Delta_{\text{sys}}Z_{\text{eff}}$ до уровня $\pm 0,8$. Полученного уровня погрешности достаточно для решения задач досмотрового контроля, сепарации горных материалов в горной промышленности, сортировки отходов и т.д.

4.2 Оценка статистической составляющей погрешности измерения эффективного атомного номера

Для оценки шумов эффективного атомного номера Z_{eff} (среднеквадратических отклонений σZ_{eff}) воспользуемся разложением (10) по малым приращениям, который приводит к выражению (14). Из (14) выводится формула для приблизительного вычисления среднеквадратического отклонения оценки эффективного атомного номера σZ_{eff} . Для этого вычисляются квадраты левой и правой части (16), используются теоремы о средних значения независимости случайных величин. После этого из правых и левых частей преобразования извлекаются квадратные корни. Результирующее выражение для оценки σZ_{eff} выглядит следующим образом

$$\sigma Z_{\text{eff}} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial T_L(\rho h, Z)}{\partial(\rho h)}\right)^2 \sigma^2 T_H + \left(\frac{\partial T_H(\rho h, Z)}{\partial(\rho h)}\right)^2 \sigma^2 T_L}}{|\det J|}, \quad (17)$$

где $\sigma^2 T_L(\rho h, Z)$ и $\sigma^2 T_H(\rho h, Z)$ – дисперсии случайных величин $T_L(\rho h, Z)$ и $T_H(\rho h, Z)$ – толщин объекта контроля в длинах свободного пробега для «преимущественно мягкой» и «преимущественно жёсткой» составляющих рентгеновского излучения

Дисперсии СВ $T_L(\rho h, Z)$ и $T_H(\rho h, Z)$ – $\sigma^2 T_L(\rho h, Z)$ и $\sigma^2 T_H(\rho h, Z)$ связаны с дисперсиями исходных аналоговых сигналов $\sigma^2 I_L(\rho h, Z)$ и $\sigma^2 I_H(\rho h, Z)$ и средними значениями $I_L(\rho h, Z)$ и $I_H(\rho h, Z)$ исходных аналоговых сигналов следующими несложными соотношениями

$$\begin{aligned} \sigma^2 T_L &= \frac{\sigma^2 I_L}{I_L^2} + \frac{\sigma^2 I_{0L}}{I_{0L}^2} \\ \sigma^2 T_H &= \frac{\sigma^2 I_H}{I_H^2} + \frac{\sigma^2 I_{0H}}{I_{0H}^2} \end{aligned} \quad (18)$$

Дисперсии $\sigma^2 I_L(\rho h, Z)$ и $\sigma^2 I_H(\rho h, Z)$ определяются [9, 43] количеством зарегистрированных фотонов рентгеновского излучения в схеме измерений коэффициента ослабления (коэффициента радиационной прозрачности) с объектом контроля и без него (измерения по воздуху) – $N_L(\rho h, Z)$, $N_H(\rho h, Z)$,

$N_L(0,Z)$, $N_H(0,Z)$, а также значениями коэффициентов накопления флуктуаций – $\eta_{L}^2(\rho h,Z)$, $\eta_{H}^2(\rho h,Z)$, $\eta_{L}^2(0,Z)$, $\eta_{H}^2(0,Z)$.

Соответствующие выражения для вычисления дисперсий $\sigma^2 T_L(\rho h,Z)$ и $\sigma^2 T_H(\rho h,Z)$ имеют вид

$$\begin{aligned}\sigma^2 T_L &= \frac{\eta_L^2}{N_L} + \frac{\eta_{0L}^2}{N_{0L}} \\ \sigma^2 T_H &= \frac{\eta_H^2}{N_H} + \frac{\eta_{0H}^2}{N_{0H}}.\end{aligned}\quad (19)$$

Одним из основных параметров системы инспекционного досмотрового контроля с функцией оценки эффективного атомного номера материала ОК является её (системы) производительность, однозначно связанная со временем измерения t . Число фотонов рентгеновского излучения, испытавших взаимодействие с материалом объекта контроля (его структурными фрагментами) и зарегистрированных первым и вторым детекторами сэндвича, $N_L(\rho h,Z)$ и $N_H(\rho h,Z)$ вычисляются по формулам

$$\begin{aligned}N_L(\rho h,Z) &= n_0 t \int_0^{E_{\max}} f(E, E_{\max}) e^{-m(E,Z)\rho h} \varepsilon_L(E) dE \\ N_H(\rho h,Z) &= n_0 t \int_0^{E_{\max}} f(E, E_{\max}) e^{-m(E,Z)\rho h - m_L(E,Z_L)\rho_L h_L - m_F(E,Z_F)\rho_F h_F} \varepsilon_H(E) dE\end{aligned}\quad (20)$$

Выражения для вычисления коэффициентов накопления флуктуаций приведены в работах [32, 38].

Совокупность формул (17)–(20) позволяет исследовать влияние параметров системы инспекционного досмотрового контроля с функцией измерения эффективного атомного номера на её производительность (системы) и может послужить дополнением к рекомендациям по рациональному выбору указанных параметров – толщин радиационно-чувствительных преобразователей первого и второго детекторов сэндвича и толщины промежуточного фильтра.

4.2.1 Выбор толщины радиационно-чувствительного преобразователя первого детектора сэндвича

На первом этапе рассмотрим влияние толщины первого детектора на величину среднеквадратической погрешности оценки Z_{eff} .

На рисунке 9 приведены результаты расчётов зависимости σZ_{eff} от h_L для различных значений параметров системы при фиксированной максимальной энергии рентгеновского излучения $E_{\text{max}}=160$ кэВ.

Положение минимума и минимальное значение функции $\sigma Z_{\text{eff}}(h_L)$ зависит от массовой толщины и атомного номера материала ОК. Среднеквадратическое отклонение оценки эффективного атомного номера увеличивается с возрастанием атомного номера материала ОК. Положение минимума сдвигается с возрастанием эффективного атомного номера материала ОК в сторону увеличения h_L . Минимум исследуемой функции с ростом Z становится менее ярко выраженным. Для исследуемого диапазона вариации массовой толщины значения σZ_{eff} изменяются в пределах 20 % для материалов, характерных для досмотрового контроля (органические материалы, алюминий, сталь). В силу специфики досмотрового контроля можно рекомендовать выбор толщины первого детектора из оксисульфида гадолиния h_L из диапазона от 0,5 мм до 1 мм.

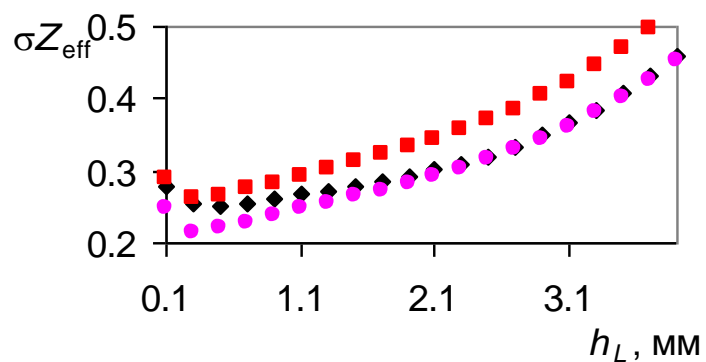
4.2.2 Выбор толщины промежуточного фильтра сэндвича

Введение промежуточного фильтра между радиационно-чувствительными преобразователями первого и второго детектора сэндвича приводит к ужесточению пучка рентгеновского излучения, падающего на второй детектор и к более значимому разделению мягкой и жёсткой составляющей излучения (смотри рисунок 1). Практическая полезность введения фильтра в схему регистрации излучения иллюстрируется данными, приведёнными на рисунке 9.

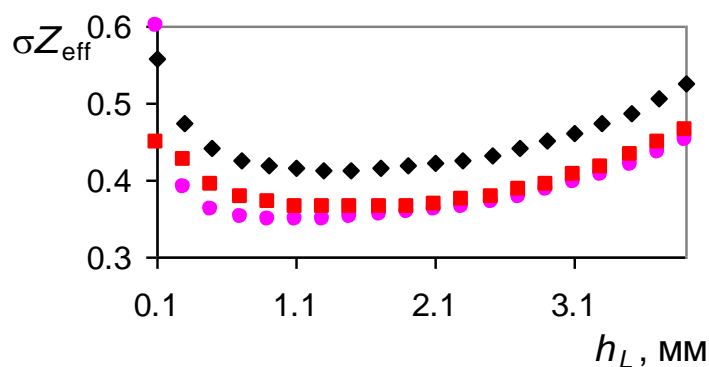
Очевидно, что промежуточный фильтр практически не искажает информативный сигнал с первого детектора. Среднее значение и среднеквадратическое значение с увеличением толщины промежуточного фильтра сигнала со второго детектора уменьшаются. Из анализа выражений (19) следует, что $\sigma^2 T_H$ является возрастающей функцией от h_F . Ужесточение пучка, обусловленное наличием промежуточного фильтра, приводит к увеличению

$\frac{\partial T_H(\rho h, Z)}{\partial(\rho h)}$. Кроме этого, производная $|\det J(\rho h, Z)|$ с возрастанием h_F уменьшается. Анализ совокупности описанных закономерностей позволяет сделать заключение

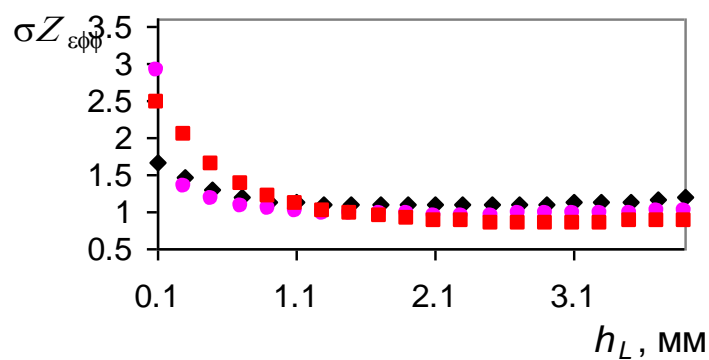
о существовании оптимального значения h_F , для которого значение σZ_{eff} минимально.



$Z=6$



$Z=13$



$Z=26$

Рисунок 9. Зависимости $\sigma Z_{\text{eff}}(h_L)$, $E_{\text{max}}=160$ кэВ, $h_H=10$ мм, $h_F=0,5$ мм, $n_{0t}=10^5$:

♦ – $\rho h = 1$ г/см²; ● – $\rho h = 3$ г/см²; ■ – $\rho h = 5$ г/см²

На рисунке 10 приведены зависимости $\sigma Z_{\text{eff}}(h_F)$, рассчитанные для углерода ($Z=6$), алюминия ($Z=13$) и железа ($Z=26$) для $E_{\text{max}}=160$ кэВ, $h_H=10$ мм CsI, $h_L=0,5$ мм Gd_2SO_2 и $\rho h = 1$ г/см², 3 г/см², 5 г/см². Толщину промежуточного фильтра варьировали в диапазоне от 0,5 до 5,5 мм.

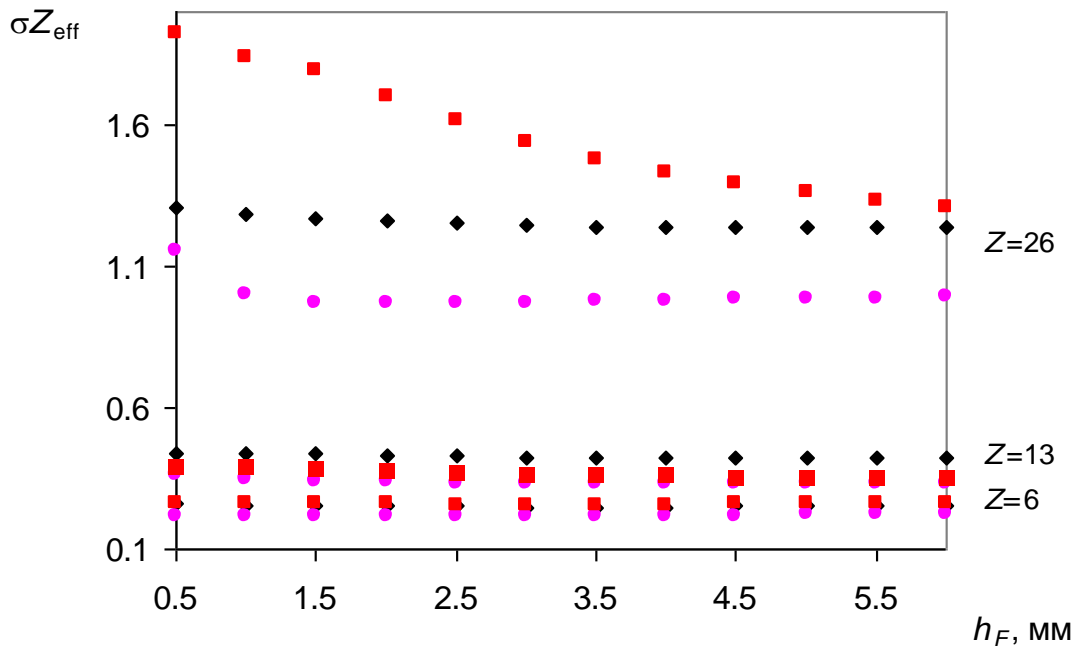


Рисунок 10. Зависимости $\sigma Z_{\text{eff}}(h_F)$, $E_{\text{max}}=160$ кэВ, $h_H=10$ мм, $h_L=0,5$ мм, $n_0 t=10^5$:
 ♦ – $\rho h = 1$ г/см²; ● – $\rho h = 3$ г/см²; ■ – $\rho h = 5$ г/см²

Минимум зависимости $\sigma Z_{\text{eff}}(h_F)$ является слабо выраженным. Положение минимума практически не зависит от массовой толщины. С увеличением эффективного атомного номера положение минимума $\sigma Z_{\text{eff}}(h_F)$ смещается в сторону увеличения h_F . Толщина предварительного фильтра h_F может быть выбрана из диапазона от 1 до 2 мм.

4.2.3 Выбор толщины радиационно-чувствительного преобразователя второго детектора сэндвича

Очевидно, что функция $\sigma Z_{\text{eff}}(h_H)$ является убывающей, так как при увеличении толщины второго детектора его эффективность регистрации увеличивается. Для иллюстрации упомянутого положения на рисунке 11 приведены зависимости $\sigma Z_{\text{eff}}(h_H)$ для различных уровней Z и ρh .

Графики, приведённые на рисунке 11, подтверждают положение, высказанное выше. Для рассматриваемого примера толщина второго детектора из CsI должна быть не менее 5 мм.

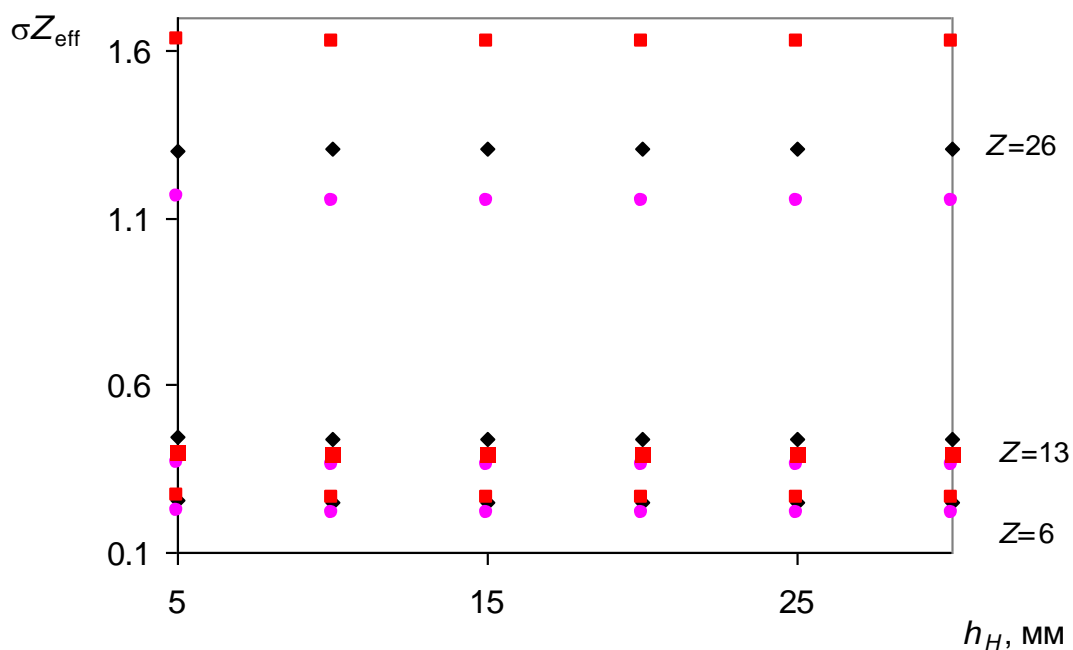


Рисунок 11. Зависимости $\sigma Z_{\text{eff}}(h_F)$ для $E_{\text{max}}=160$ кэВ, $h_H=10$ мм, $h_L=0,5$ мм, $n_0 t=10^5$:
 ♦ – $\rho h = 1$ г/см²; ● – $\rho h = 3$ г/см²; ■ – $\rho h = 5$ г/см²

Результаты проведённых исследований позволяют корректно выбрать толщины радиационно-чувствительных преобразователей первого, второго детекторов сэндвича и промежуточного фильтра в задаче измерения эффективного атомного номера, используемого в качестве параметра распознавания материалов при инспекционном досмотровом контроле на основе разделения «преимущественно мягкого» и «преимущественно жёсткого» рентгеновского излучения.

5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является проектирование и создание конкурентоспособных разработок, технологий, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- определение потенциальных потребителей НИР;
- анализ конкурентоспособности проекта;
- организация работ по научно-исследовательскому проекту;
- планирование научно-исследовательских работ;
- оценки коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- определение финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

Технико-экономическое обоснование работы проводится с целью определения и анализа трудовых и денежных затрат, направленных на их реализацию, а также уровня их научно-технической результативности.

Результат работы магистерской диссертации, является разработка метрологического обеспечения измерения эффективного атомного номера.

Необходимо произвести расчеты по данным в соответствии с методическими требованиями.

5.1 Потенциальные потребители

Целью работы является разработка метрологического обеспечения оценки эффективного атомного номера.

В процессе выполнения выпускной работы разработана математическая модель способа измерения эффективного атомного номера на основе оценки

ослабления преимущественно мягкого и преимущественно жёсткого рентгеновского излучения, включающая в себя следующие метрологические характеристики: обобщённое уравнение измерителя; алгоритм обработки информации; оценку чувствительности способа; исследование устойчивости к шумам в исходной информации; допустимые диапазоны изменения эффективного атомного номера и массовой толщины.

Потенциальными потребителями результатами работы являются: досмотровые пункты контроля (автовокзалы, аэропорты, метро и т.д.), полиция, охранные предприятия, служба безопасности организаций, производители смотровых лент (ADANI, Eagle, Rapiscan, TSNK и т.д.).

5.2 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта.

SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Матрица SWOT

	<p>Сильные стороны:</p> <p>С1. Данный метод все больше и больше изучается, дорабатывается.</p> <p>С2. Разработка метрологического обеспечения, представленная в работе, несет экономичность и ресурсоэффективность.</p> <p>С3. Актуальность метода.</p> <p>С4. Наличие опытного руководителя</p>	<p>Слабые стороны:</p> <p>Сл1. Отсутствие потенциальных потребителей.</p> <p>Сл2. Сложность внедрения в существующее оборудование.</p> <p>Сл3. Отсутствие квалифицированных кадров</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Нетрудоемкая адаптация разработки под иностранные языки.</p> <p>В2. Большой потенциал применения разработки в России и других странах.</p>		
<p>Угрозы:</p> <p>У1: Отсутствие спроса на данный метод в рамках практического применения</p>		

Далее выявим соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта (работы) обобщённым внешним угрозам и условиям окружающей среды.

Таблица 2 – Интерактивная матрица сильных сторон и слабых сторон

	C1	C2	C3	C4
B1	+	–	+	+
B2	+	+	+	0
У1	+	+	0	0
	Сл1	Сл2	Сл3	
B1	0	+	0	
B2	0	+	0	
У1	–	+	-	

Анализ интерактивных матриц, приведённых в таблице 2, представляется в форме записи сильно коррелирующих сильных сторон и возможностей, или слабых сторон и возможностей и так далее, и записывается в следующем виде: B1C1C3C4; B2C2C3.

Каждая из записей представляет собой направление реализации проекта.

Итак, самой большой угрозой для проекта является отсутствие спроса.

Во избежание влияния слабых сторон на проект (научно-исследовательскую работу) требуется привлечение опытных и высококвалифицированных специалистов. Набор нового персонала должен сопровождаться его обучением.

Таким образом, несмотря на то, что коммерческого потенциала нет у данного исследования, так как работа олицетворяет теоретическую значимость, результаты научно-исследовательской работы актуальны для предприятий, которые занимаются разработкой и производством багажных сканеров, пунктов досмотрового контроля.

В таблице 3 представлены направления развития с учётом сильных и слабых сторон разрабатываемого проекта.

Таблица 3 – Матрица SWOT

	<p>Сильные стороны: С1. Данный метод все больше и больше изучается, дорабатывается. С2. Разработка метрологического обеспечения, представленная в работе, несет экономичность и ресурсоэффективность. С3. Актуальность метода. С4. Наличие опытного руководителя</p>	<p>Слабые стороны: Сл1. Отсутствие потенциальных потребителей. Сл2. Сложность внедрения в существующее оборудование. Сл3. Отсутствие квалифицированных кадров</p>
<p>Возможности: В1. Нетрудоемкая адаптация разработки под иностранные языки. В2. Большой потенциал применения разработки в России и других странах.</p>	<p>Сохранение знаний научного руководителя в организации.</p>	<p>Обучение специалистов. Привлечение к работе более опытных специалистов.</p>
<p>Угрозы: У1: Отсутствие спроса на данный метод в рамках практического применения</p>	<p>Перевод математической модели на иностранные языки.</p>	<p>Публикация большего количества материалов для потенциальных потребителей (статьи, участие в конференциях).</p>

5.3 Оценка готовности проекта к коммерциализации

В таблице 4 представлен бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации.

По результатам оценки можно сказать, что перспективность проекта к коммерциализации средняя. Для того чтобы повысить уровень перспективности проекта к коммерциализации необходимо более детально определить направления коммерциализации, разработать бизнес-план детальный, провести маркетинговые исследования. А также повысит уровень знаний разработчика проекта.

В будущем в качестве метода коммерциализации можно использовать передачу интеллектуальной собственности.

Таблица 4 – бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1.	Определен имеющийся научно-технический задел	3	2
2.	Определены перспективные направления коммерциализации научно- технического задела	2	2
3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	4	3
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	4	3
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	3	3
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	2	1
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	3	3
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	2	2
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	2	2
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	2	2
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	2	1
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	1	1
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	1	1
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	2	2
15	Проработан механизм реализации научного проекта	2	2
	ИТОГО	35	30

5.4 Планирование работ по научно-техническому исследованию

Планирование этапов работ по выполнению проекта включает составление перечня этапов и работ, а также распределение исполнителей по всем видам работ. В таблице 5 приведены основные этапы и содержание работ с распределением ответственных исполнителей.

Таблица 1 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Создание темы проекта	1	Составление и утверждение темы проекта	Научный руководитель
	2	Выдача технического задания НИР	
Выбор направления исследования	3	Поиск и изучение материала по теме	Студент
	4	Подбор, изучение и анализ требований нормативных документов	
	5	Выбор направления исследований	Научный руководитель, студент
	6	Календарное планирование работ	
Теоретические исследования	7	Изучение научно-технической литературы	Студент
	8	Изучение научных исследований, научных статей	
Экспериментальные исследования	9	Проведение расчетов, обработка результатов, построение графиков	Студент
	10	Анализ полученных результатов, выводы	
Оценка полученных результатов	11	Оценка эффективности полученных результатов	Научный руководитель, студент
	12	Вывод по цели	Студент
Оформление отчета по НИР	13	Завершение оформления работы	Студент

5.2.1 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5}, \quad (21)$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

t_{mini} – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, чел.-дн.;

t_{maxi} – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, чел.-дн..

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_{pi} , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}, \quad (22)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб.дн.;

$t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

5.2.2 Разработка графика проведения научного исследования

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{кал} \quad (23)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{кал}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}}, \quad (24)$$

где $T_{кал}$ – количество календарных дней в году;

$T_{вых}$ – количество выходных дней в году;

$T_{пр}$ – количество праздничных дней в году.

Согласно производственному и налоговому календарю на 2015 год, количество календарных 365 дней, количество рабочих дней составляет 247 дней, количество выходных 104 дней, а количество предпраздничных дней – 14, таким образом: $k_{кал}=1,48$.

Все рассчитанные значения (временные показатели проведения научного исследования) вносим в таблицу 6.

Для иллюстрации календарного плана проекта (научно-исследовательской работы) с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени работы над магистерской диссертацией построена диаграмма Ганта, приведённая в приложение Б.

Диаграмма Ганта представляет собой горизонтальный ленточный график, на котором все виды работ по теме научно-исследовательских исследований представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Из диаграммы видно, что работа над выпускной квалификационной работой в форме магистерской диссертации началась в первой декаде февраля, а закончилась в первой декаде июня. Некоторые виды работ выполнялись параллельно, например, поиск и изучение материала по теме выполнялись одновременно с подбором, изучением и анализом требований нормативных документов. Так же можно увидеть, что один вид работ выполнялся несколькими исполнителями, например, работу по календарному планированию студент и научный руководитель выполняли совместно.

Таблица 2 – Временные показатели проведения научного исследования

№ п/п	Вид работы	Трудоемкость работы			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях T_{pi}	Длительность работ в календарных днях T_{ki}
		t_{min} , чел- дни	t_{max} , чел- дни	$t_{ож}$, чел- дни			
1	Составление и утверждение темы проекта	1	2	1,4	Р	1,4	2
2	Выдача технического задания НИР	3	4	3,4	Р	3,4	5
3	Поиск и изучение материала по теме	8	13	10,1	С	10,1	15
4	Подбор, изучение и анализ требований нормативных документов	8	13	10,1	С	10,1	15
5	Выбор направления исследований	5	13	8,2	Р, С	4,1	6
6	Календарное планирование работ	3	4	6,8	Р,С	3,4	5
7	Изучение научно-технической литературы			16,9	С	16,9	25
8	Изучение научных исследований, научных статей	11	17	13,5	С	13,5	20
9	Проведение расчетов, обработка результатов, построение графиков	17	25	20,3	С	20,3	30
10	Анализ полученных результатов, выводы	2	4	2,7	С	2,7	4
11	Оценка эффективности полученных результатов	5	13	8,2	Р, С	4,1	6
12	Вывод по цели	1	4	2	С	2	3
13	Завершение оформления работы	5	9	6,7	С	6,7	10

5.3 Бюджет научного исследования

Затраты представляют собой все производственные формы потребления денег и измеримых в денежном измерении материальных ценностей, которые служат непосредственной производственной целью.

Рассчитываем смету расходов, включая затраты на приобретение необходимого оборудования для разработки проекта и текущие расходы. Затраты, образующие себестоимость продукции (работ, услуг), группируются в соответствии с их экономическим содержанием по следующим элементам:

$$K_{\text{проекта}} = I_{\text{мат}} + I_{\text{ам.техн}} + I_{\text{зп}} + I_{\text{соц.отч.}} + I_{\text{накл.расх}} + I_{\text{прочие}} \quad (25)$$

Материальные затраты отражают стоимость приобретенных материалов и сырья, которые входят в состав вырабатываемой продукции, образуя ее основу, или являются необходимыми компонентами при изготовлении продукции.

5.3.1 Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ

Для проведения научно-исследовательской работы требуется ноутбук, лицензионное ПО Microsoft, лицензионное ПО Mathcad.

Амортизация основных фондов – сумма амортизационных отчислений на полное восстановление основных производственных фондов, вычисленная исходя из их балансовой стоимости и утвержденных норм амортизации. Корректно при расчете затрат учитывать в году приобретения и в последующие годы только ту часть затрат, которая происходит от старения основных фондов в каждом году.

Таблица 7 – Материальные затраты на оборудование и программное обеспечение

Оборудование и ПО	Ед. изм.	Срок службы, год	Кол-во, ед.	Цена за ед., руб.	Затраты, руб.
Ноутбук	Шт.	15	1	105000	105000
Лицензионное ПО Microsoft	Шт.	<u>бессрочная</u>	1	6000	6000
Лицензионное ПО Mathcad	Шт.	бессрочная	1	55000	45000
Итого					166000

Рассчитаем амортизацию оборудования $I_{\text{ам.обор.}}$ по следующей формуле

$$I_{\text{изм.обор.}} = \frac{T_{\text{исп.обор.}}}{365} \cdot K_{\text{обор.}} \cdot N_a, \quad (26)$$

где $T_{\text{исп.обор.}}$ – время использования оборудования;

365 дней – количество дней в году;

$K_{\text{обор.}}$ – стоимость оборудования;

N_a – норма амортизации

$$N_a = \frac{1}{T_{\text{с.с.обор.}}}, \quad (27)$$

где $T_{\text{с.с.обор.}}$ – срок службы оборудования.

$$I_{\text{ам.ноут.}} = \frac{T_{\text{исп.обор.}}}{365} \cdot K_{\text{ноут.}} \cdot N_a = \frac{80}{365} \cdot 105000 \cdot \frac{1}{15} = 1260 \quad (28)$$

5.3.2 Основная заработная плата

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта.

Необходимо рассчитать основную заработную плату для:

- руководителя (от ТПУ);
- студента (магистр ТПУ).

Основная заработная плата руководителя (инженера) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}}, \quad (29)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата одного работника;

$T_{\text{раб}}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб.дн., представлена в таблице 4;

$Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}, \quad (30)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 25 раб.дня M равно 11,2 месяца, 5-дневная неделя,

при отпуске в 48 раб.дней М равно 10,4 месяца, 6-дневная неделя ;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала (в рабочих днях), из таблицы 8.

Таблица 3 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
– выходные дни	104	104
– праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
– отпуск	48	72
– невыходы по болезни	-	-
Действительный годовой фонд рабочего времени	199	175

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{tc} \cdot K_p, \quad (31)$$

где Z_{tc} – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

K_p – районный коэффициент, равный 30 % (Томская область).

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 9.

Таблица 4 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	Z_{tc} , руб.	K_p	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб.	$T_{раб}$, раб.дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	23500	1,3	30550	1596.5	24	38316.0
Студент	6500	1,3	8450	422.5	149	62952.5
Итого						101 268.5

Заработная плата научного руководителя составила 38316 рублей, студента – 62952.5 рублей. Общая основная заработная плата составила 101268.5 рублей.

5.3.3 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормативных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций.

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$З_{доп} = K_{доп} \cdot З_{осн} , \quad (32)$$

где, $K_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Таким образом, дополнительная заработная плата руководителя равна 4597,9 рублей, студента – 7554.3 рублей.

5.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы (см. табл. 10):

$$З_{внеб} = K_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}) . \quad (33)$$

где, $K_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На 2019 г. в соответствии с Федеральным закона от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона № 212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2019 году водится пониженная ставка – 27,1%.

Таблица 5 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.
Научный руководитель	38316.0	62952.5
Инженер-студент	99415.8	7554.3
Коэффициент отчисления во внебюджетные фонды	0,271	
Итого	56432.6	

Отчисления во внебюджетные фонды составило 56432.6 рубля.

5.3.5 Накладные расходы

Величина накладных расходов определяется по формуле:

$$З_{накл} = (\sum статеи) \cdot K_{нр} , \quad (34)$$

где, $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.
Таким образом, накладные расходы равны:

$$(38316.0 + 4597.9 + 62952.5 + 7554.3) * 0.16 = 11281.1 \text{ рублей.}$$

5.3.6 Формирование бюджета затрат научного исследования

Расчетная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта (см. табл. 11).

Таблица 6 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
Материальные затраты	-
Затраты на специальное оборудование для научных работ	16600
Затраты на амортизацию оборудования	1260
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	101268.5
Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	12152.2
Отчисления во внебюджетные фонды	56432.6
Накладные расходы	11281.1
Бюджет затрат на НТИ	348394.4

Бюджет затрат на выполнение научно-исследовательской работы составил 348394.4 рублей.

5.4 Оценка целесообразности исследования

В данном разделе представлены результаты определения показателя ресурсной эффективности проекта при использовании оценки сравнительной эффективности исследования. В таблице 12 представлена сравнительная оценка характеристик трёх вариантов исполнения проекта:

1) текущий проект – разработка метрологического обеспечения измерения эффективного атомного номера методом дуальных энергий для рационального выбора параметров детекторов, чтобы точность измерения была наиболее высокой;

2) метрологическое обеспечение эффективного атомного номера по обратному рассеянию (в случаях, когда применяется только один детектор);

3) метрологическое обеспечение эффективного атомного номера спектральным методом (если метод не импульсный)

Таблица 12 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,15	5	4	3
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,2	4	4	4
3. Помехоустойчивость	0,15	4	4	3
4. Энергосбережение	0,05	4	4	4
5. Надёжность	0,2	5	4	4
6. Материалоёмкость	0,25	5	3	3
Итого:	1			

Интегральный показатель ресурсоэффективности для текущего проекта:

$$I_m = \sum_{i=1}^n a_i b_i = 0,15 \cdot 5 + 0,2 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 + 0,05 \cdot 4 + 0,2 \cdot 5 + 0,25 \cdot 5 = 5,55$$

Интегральный показатель ресурсоэффективности для аналога 1:

$$I_m = \sum_{i=1}^n a_i b_i = 0,15 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 + 0,05 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 + 0,25 \cdot 3 = 3,75$$

Интегральный показатель ресурсоэффективности для аналога 2:

$$I_m = \sum_{i=1}^n a_i b_i = 0,15 \cdot 3 + 0,2 \cdot 4 + 0,15 \cdot 3 + 0,05 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 + 0,25 \cdot 3 = 3,45$$

Вывод: Основываясь на полученных результатах расчётов, можно сделать вывод, что наибольшей ресурсной эффективностью обладает текущий вариант проекта.

6 Социальная ответственность

В последние годы все большее значение приобретают требования мирового сообщества и, соответственно, практически всех государств к социальной стороне деятельности организаций. Это в равной мере относится к организациям всех типов, размеров и форм собственности вне зависимости от их географического размещения, сферы деятельности, культурных и национальных традиций.

В соответствии с ГОСТ Р ИСО 26000-2012 Руководство по социальной ответственности, под понятием «социальной ответственности» подразумевают ответственность организации за воздействие внедряемых ею решений на общество и окружающую среду [51]. Целью данного стандарта является соблюдение требований к безопасности труда и охране окружающей среды.

Одним из национальных приоритетов является вопрос об обеспечении безопасности жизни и здоровья работников в процессе трудовой деятельности. В разделе «Социальная ответственность» выпускной квалификационной работы проведен краткий анализ возможных опасных и вредных факторов при исследовании метрологического обеспечения измерения эффективного атомного номера методом дуальных энергий, включая такие факторы при работе за компьютером.

Основной целью данного раздела ВКР является рассмотрение оптимальных норм для улучшения условий труда, обеспечения производственной безопасности человека, повышения его производительности, сохранения работоспособности в процессе деятельности, а также охраны окружающей среды.

При работе с компьютером человек подвергается воздействию ряда опасных и вредных производственных факторов: повышенный уровень электромагнитных излучений, повышенный уровень ионизирующих излучений в рабочей зоне, повышенный уровень вибрации, повышенный уровень шума на рабочем месте, повышенный уровень статического электричества.

6.1 Производственная безопасность

Объектом исследования является эффективный атомный номер, алгоритм его вычисления и метрологическое обеспечение. Область применения – цифровая радиография (досмотровый контроль). Рабочим является кабинет №23 ИДК-2. Опасные и вредные факторы при выполнении работ представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Опасные и вредные факторы при работе

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
1. Пайка проводов и микросхемы	1. Недостаточная освещённость рабочей зоны; 2. Повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны; 3. Повышенная загазованность воздуха рабочей зоны парами вредных химических веществ (паяльный флюс).	1. Брызги припоев и флюсов; 2. Высокая температура паяльника	1. Нормирование значения освещённости на рабочих местах производственных помещений при искусственном освещении устанавливаются СНиП 23-05-95 [51]. 2. Параметры микроклимата устанавливаются СанПиН 2.2.4-548-96 [54].
2. Сборка конструкции	1. Повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны.	1. Острые кромки, заусенцы и шероховатость на поверхности инструментов.	3. Электробезопасность на рабочем месте регулируется по ГОСТ Р 12.1.019-2009 [54].
3. Исследование характеристик с помощью генератора и осциллографа	1. Недостаточная освещённость рабочей зоны; 2. Повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны.	1. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека.	4. Категории помещений по взрывопожарной и пожарной опасности регламентируются СП 12.13130.2009 [55].

6.2 Анализ выявления вредных факторов

6.2.1 Расчёт освещённости рабочего места

Освещённость рабочего места. Освещённость – это поверхностная плотность светового потока. Рациональное освещение рабочего места является одним из важнейших условий создания благоприятных и безопасных условий труда. Неудовлетворительное в количественном или качественном отношении освещение не только утомляет зрение, но и вызывает утомление организма в целом. Нерационально организованное освещение может, кроме того может явиться причиной травматизма: плохо освещенные опасные зоны, слепящие источники света и блики от них, резкие тени и пульсации освещенности ухудшают видимость и могут вызвать неадекватное восприятие наблюдаемого объекта

Таблица 14 – Основные параметры лабораторного помещения

Параметры	Значения
Длина А, м	15
Ширина В, м	10
Высота Н, м	4,5
Высота рабочей поверхности h_{rp} , м	1
Коэффициент отражения бетонных стен с окнами ρ_c , %	50
Коэффициент отражения свежепобелённого потолка ρ_n , %	70

Площадь помещения находится по формуле:

$$S = A \cdot B \quad (35)$$

Расчёт площади помещения:

$$S = A \cdot B = 15 \cdot 10 = 150 \text{ м}^2$$

Допустимые значения наименьшей освещенности рабочего места для данного лабораторного помещения приведены в таблице 15.

Согласно СП 52.13330.2011, в помещениях вычислительных центров необходимо применить систему комбинированного освещения [50]. Освещение должно включать в себя как естественное, так и искусственное. В качестве

источников искусственного освещения следует применять преимущественно люминесцентные лампы типа ЛБ.

Таблица 15 – Нормирование значения освещенности на рабочих местах производственных помещений при искусственном освещении, согласно СНиП 23-05-95 [51]

Характеристика зрительной работы	Наименьший размер объекта, мм	Подразряд зрительной работы	Контраст объекта различения с фоном	Характеристика фона	Освещённость Е, лк	
					Комбинированное освещение	Общее освещение
Малая точность (5 разряд зрительной работы)	1,0-5,0	а	малый	тёмный	300	200

В качестве источника света выбираем газоразрядную люминесцентную лампу дневной цветности ЛД-80, световой поток $\Phi_{\text{ЛД}}$ которой равен 4250 Лм. Т.к. данное лабораторное помещение обладает умеренной влажностью и запылением, а так же хорошим отражением потолка и стен, то в качестве светильника выбираем открытые двухламповые типа ОД-2-80. В таблице 16 представлены основные характеристики данного светильника.

Таблица 16 – Основные характеристики открытых двухламповых светильников типа ОД-2-80

Количество и мощность лампы	Длина, мм	Ширина, мм	Высота, мм	КПД, %	Наименьшая допустимая высота подвеса над полом $h_{\text{п}}$, м
2x80	1531	266	198	75	3,5

При выполнении работ категории высокой зрительной точности (наименьший размер объекта различения 0,3...0,5 мм) величина коэффициента естественного освещения (КЕО) должна быть не ниже 1,5%, а при зрительной работе средней точности (наименьший размер объекта различения 0,5...1,0 мм) КЕО должен быть не ниже 1,0%. В качестве источников искусственного

освещения обычно используются люминесцентные лампы, которые попарно объединяются в светильники, которые должны располагаться над рабочими поверхностями равномерно.

Требования к освещенности в помещениях, где установлены компьютеры, следующие: при выполнении зрительных работ высокой точности общая освещенность должна составлять 300 лк, а комбинированная – 750 лк; аналогичные требования при выполнении работ средней точности – 200 и 300 лк соответственно.

Кроме того, все поле зрения должно быть освещено достаточно равномерно – это основное гигиеническое требование. Другими словами, степень освещения помещения и яркость экрана компьютера должны быть примерно одинаковыми, т.к. яркий свет в районе периферийного зрения значительно увеличивает напряженность глаз и, как следствие, приводит к их быстрой утомляемости.

В таблице 17 приведено нормирование освещённости.

Таблица 17 – Нормирование освещенности

Характеристика зрительной работы	Наименьший размер объекта различения, мм	Разряд зрительной работы	Подразряд зрительной работы	Контраст объекта с фоном	Характеристика фона	Искусственное освещение		
						Освещенность, лк		
						При системе комбинированного освещения		При системе общего освещения
						Всего	В том числе от общего	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Высокой точности	Св. 0,30 до 0,50	III	б	Малый средний	Средний темный	1000 750	200 200	300 200

В таблице 18 приведены требования к освещению на рабочих местах, оборудованных персональными компьютерами.

Таблица 18 – Требования к освещению на рабочих местах, оборудованных ПК

Освещенность на рабочем столе	300-500 лк
Освещенность на экране ПК	Не выше 300 лк
Прямая блескость источника света	200 кд/м ²
Показатель ослепленности	Не более 20
Показатель дискомфорта	Не более 15
Отношение яркости	
Между рабочими поверхностями	3:1-5:1
Между поверхностью стен и оборудованием	10:1
Коэффициент пульсации	Не более 5%

Увлечение коэффициента пульсации освещенности снижает зрительную работоспособность, повышает утомляемость, воздействует на нервные элементы коры головного мозга и фоторецепторные элементы сетчатки глаз. Для снижения пульсации используются светильники, в которых лампы работают от переменного тока частотой 400Гц и выше.

Коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, для помещений с малым выделением пыли равен $K_3 = 1,5$. Коэффициент неравномерности люминесцентных ламп $Z=1,1$. Принимаем $\lambda=1,4$. Высоту светильников h_c (свес) принимаем равной 0,5 м.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = H - h_{pn} - h_c \quad (36)$$

Расчёт высоты светильника над рабочей поверхностью:

$$h = H - h_{pn} - h_c = 4,5 - 1 - 0,5 = 3 \text{ м}$$

Расстояние между соседними рядами определяется по формуле:

$$L = \lambda \cdot h \quad (37)$$

Расчёт расстояния между соседними рядами:

$$L = \lambda \cdot h = 1,4 \cdot 3 = 4,2 \text{ м}$$

Расстояние от крайних светильников или рядов до стены определяется по формуле:

$$l = \frac{L}{3} \quad (38)$$

Расчёт расстояния от крайних светильников или рядов до стены:

$$l = \frac{L}{3} = \frac{4,2}{3} = 1,4 \text{ м}$$

Число рядов светильников в помещении определяется по формуле:

$$Nb = \frac{B}{L} \quad (39)$$

Расчёт числа рядов светильников в помещении:

$$Nb = \frac{B}{L} = \frac{10}{4,2} = 2,38 \approx 3$$

Число светильников в ряду определяется по формуле:

$$Na = \frac{A}{L} \quad (40)$$

Расчёт числа светильников в ряду:

$$Na = \frac{A}{L} = \frac{15}{4,2} = 3,57 \approx 4$$

Общее число ламп:

$$N = 2 \cdot Nb \cdot Na = 2 \cdot 3 \cdot 4 = 24$$

Расчёт расстояния между соседними светильниками с учётом длины помещения и длины светильников:

$$3 \cdot L_1 + \frac{2}{3} \cdot L_1 + Na \cdot D = A$$

$$L_1 = \frac{3 \cdot (A - Na \cdot D)}{11} = \frac{3 \cdot (15000 - 4 \cdot 1531)}{11} = 2420 \text{ мм}$$

Расчёт расстояния от крайних светильников до стены с учётом длины помещения и длины светильников:

$$\frac{L_1}{3} = 807 \text{ мм}$$

Расчёт расстояния между соседними рядами с учётом ширины помещения и ширины светильников:

$$2 \cdot L_2 + \frac{2}{3} \cdot L_2 + Nb \cdot S = B$$

$$L_2 = \frac{3 \cdot (B - Nb \cdot S)}{8} = \frac{3 \cdot (10000 - 3 \cdot 266)}{8} = 3450 \text{ мм}$$

Расчёт расстояния от крайних рядов до стены с учётом ширины помещения и ширины светильников:

$$\frac{L_2}{3} = 1150 \text{ мм}$$

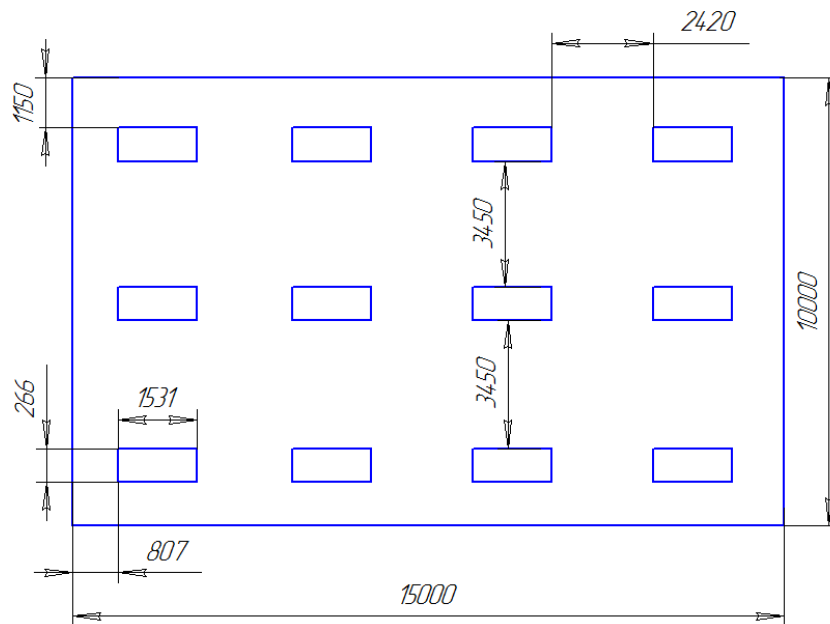


Рисунок 12 – План помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами

Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} \quad (41)$$

Расчёт индекса помещения:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} = \frac{15 \cdot 10}{3 \cdot (15 + 10)} = \frac{150}{75} = 2$$

Коэффициент использования светового потока $\eta = 0,6$.

Световой поток группы люминесцентных ламп определяется по формуле:

$$\Phi = \frac{E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot \eta} \quad (42)$$

Расчёт светового потока группы люминесцентных ламп:

$$\Phi = \frac{E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot \eta} = \frac{200 \cdot 150 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{24 \cdot 0,6} = 3437,5 \text{ лм}$$

Проверка выполнения условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{ЛБ} - \Phi}{\Phi_{ЛБ}} \cdot 100\% \leq 20\%$$
$$\frac{4250 - 3437,5}{4250} \cdot 100\% = 19,2\%;$$

Вывод: Необходимый световой поток не выходит за пределы требуемого диапазона.

6.2.2 Микроклимат рабочего помещения

Так же для безопасной работы необходимо соблюдать показатели микроклимата, в нашем случае, для категории работ по уровню энергозатрат Ia (таблица 19) по СанПиН 2.2.4.548-96 [51]. Параметры микроклимата оказывают непосредственное влияние на тепловое состояние человека. Понижение температуры и повышение скорости движения воздуха, способствует усилению конвективного теплообмена и процесса теплоотдачи при испарении пота, что может привести к переохлаждению организма. При повышении температуры воздуха возникают обратные явления.

Переносимость человеком температуры, как и его теплоощущение, в значительной мере зависит от влажности и скорости окружающего воздуха. Чем больше относительная влажность, тем меньше испаряется пота в единицу времени и тем быстрее наступает перегрев тела.

Особенно неблагоприятное воздействие на тепловое самочувствие человека оказывает высокая влажность при температурах окружающего воздуха более 30°C, так как при этом почти вся выделяемая теплота отдается в окружающую среду при испарении пота. При повышении влажности пот не испаряется, а стекает каплями с поверхности кожного покрова. Возникает так называемое проливное течение пота, изнуряющее организм и не обеспечивающее необходимую теплоотдачу.

Недостаточная влажность приводит к интенсивному испарению влаги со слизистых оболочек их пересыхания и растрескивания, а затем и к загрязнению болезнетворными микробами. Поэтому, при длительном пребывании людей в закрытых помещениях, рекомендуется ограничиваться относительной влажностью 30...70%

К категории Ia относятся работы с интенсивностью энергозатрат до 120 ккал/ч (до 139 Вт), производимые сидя и сопровождающиеся незначительным физическим напряжением. Для поддержания оптимальных значений микроклимата используется система отопления и кондиционирования воздуха. Для повышения влажности воздуха в помещении следует применять увлажнители воздуха с дистиллированной или кипяченой питьевой водой.

Объем помещений, в которых размещен персонал работающий на ПК, не должен быть меньше $19,5 \text{ м}^3/\text{человека}$ с учетом максимального числа одновременно работающих в смену. В рассматриваемом рабочем кабинете на каждого сотрудника приходится $24,5 \text{ м}^3$, что соответствует нормативам.

Таблица 19 – Оптимальные величины показателей микроклимата

Период года	Температура, °C		Относительная влажность, %		Скорость движения воздуха, м/с	
	Оптимальная	Допустимая на рабочих местах	Оптимальная	Допустимая, не более	Оптимальная, не более	Допустимая, не более
Холодный	19-22	15-28	40-60	20-80	0,2	<0,5
Тёплый						

В целях защиты работающих от возможного перегрева или охлаждения, при температуре воздуха на рабочих местах выше или ниже допустимых величин, время пребывания на рабочих местах (непрерывно или суммарно за рабочую смену) должно быть не более 8 часов. К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление

помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м³ на человека - не менее 30 м³ в час на человека; при объёме помещения более 40 м³ на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность - 40%, скорость движения воздуха - 0,1 м/с, температура летом -20..25 °С, зимой - 13...15 °С.

6.2.3 Электромагнитное излучение

Диссертация написана с помощью ПЭВМ. Мониторы являются источниками интенсивных электромагнитных полей. Имеющиеся внутри монитора многочисленные катушки дают электромагнитное излучение низкой частоты. Распространяется оно, зачастую, в стороны и назад, поскольку большинство экранов обладает свойством ослаблять это излучение.

Электромагнитные поля могут вызывать изменения в клетках. Длительное воздействие низких частот ЭВМ вызывает нарушения сердечнососудистой и центральной нервной системы, небольшие изменения в составе крови. Возможно возникновение катаракты глаз, злокачественных опухолей при интенсивном длительном воздействии. Безопасные уровни излучений регламентируются нормами СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03 представлены в таблице 20.

Степень воздействия зависит от продолжительности работы и индивидуальных особенностей организма.

Электромагнитные излучения – ПДУ:

при $P=10$ мкВт/см² время работы равно 8 часов;

при $P=(10-100)$ мкВт/см² время работы не более 2 часов;

при $P=(100-1000)$ мкВт/см² время работы не более 20 минут;

для населения $P=1$ мкВт/см².

Таблица 20 – Предельно-допустимые нормы ЭМП, создаваемых ПЭВМ согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03

Наименование параметров		ВДУ	ПДУ
Напряженность электрического поля	В диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	25 В/м	25 В/м
	В диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц	2,5 В/м	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	В диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	250 нТл	250 нТл
	В диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц	25 нТл	25 нТл
Напряженность электрического поля		15 кВ/м	15 кВ/м

Для снижения вредного влияния электромагнитного излучения при работе с ПК необходимо соблюдать следующие общие гигиенические требования:

1) это продолжительность непрерывной работы взрослого пользователя не должна превышать 2 ч, ребенка – 10÷20 мин, в зависимости от возраста. В процессе работы желательно менять тип и содержание деятельности, например, чередовать редактирование и ввод данных, и их считывание. Санитарными нормами предусматриваются обязательные перерывы в работе на ПК, во время которых рекомендуется делать простейшие упражнения для глаз, рук и опорно-двигательного аппарата;

2) Рабочее место с ПК должно располагаться по отношению к оконным проемам так, чтобы свет падал сбоку, предпочтительнее слева. При наличии нескольких компьютеров расстояние между экраном одного монитора и задней стенкой другого должно быть не менее 2 м, а расстояние между боковыми стенками соседних мониторов – 1,2 м. Экран монитора должен находиться от глаз пользователя на оптимальном расстоянии 60÷70 см, но не ближе 50 см;

3) Для ослабления влияния рассеянного рентгеновского излучения от монитора ПК рекомендуется использовать защитные фильтры (экраны).

Итак, основными видами средств коллективной защиты от воздействия электромагнитного поля токов промышленной частоты являются стационарные или переносные заземленные экранирующие устройства. Стационарное экранирующее устройство — это составная часть электрической установки в виде козырька, навеса или перегородки из металлических канатов, прутков, сеток, предназначенная для защиты персонала в открытых распределительных устройствах и в воздушных линиях электропередач при осмотре оборудования и при оперативном наблюдении за производством работ. Переносные экраны, также используемые при работах по обслуживанию электроустановок, бывают в виде съемных козырьков, навесов, перегородок, палаток, щитов.

Наряду со стационарными и переносными экранирующими устройствами применяются индивидуальные экранирующие комплекты. В состав комплекта входят: спецодежда, спецобувь, средства защиты головы, а также рук и лица. Составные элементы комплектов объединяются в единую электрическую цепь и через обувь или с помощью специального проводника со струбциной обеспечивают качественное заземление.

6.3 Анализ выявления опасных факторов

6.3.1 Электробезопасность

Результатом воздействия электрического тока на организм человека могут быть электротравмы и электроудары, смерть. Ток питается от сети переменного тока частотой 50Гц и является опасным, т.к. наиболее опасным является ток 20 – 100Гц.

Кабинет № 23 корпуса относится к 1-му классу электробезопасности (помещение без повышенной опасностью) так, как данное помещение сухое, беспыльное, с нормальной температурой воздуха, токоизолирующими полами и имеет оборудование напряжением 220 В (до 1000 В). Безопасное значение тока $I < 0.1$ А, а значение напряжения $U < (12 \div 36)$ В.

Действующая классификация помещений по опасности поражения электрическим током определяет объект к категории повышенной опасности при наличии в них одного из следующих условий:

- 1) сырость (помещения, с относительной влажностью больше 75 %);
- 2) токопроводящая пыль (постоянное образование пыли с токопроводящими свойствами);
- 3) помещения с токопроводящими полами (наличие железобетонных, металлических, кирпичных и иных типов токопроводящих напольных покрытий);
- 4) высокий уровень температуры (помещения в которых температура постоянно превышает $+35^{\circ}\text{C}$);
- 5) условия (возможность), когда человек может одновременно прикоснуться к металлическим корпусам электрооборудования и к заземленным металлоконструкциям зданий (из примеров можно привести случай, когда человек может взяться одной рукой за батарею отопления - второй за корпус станка).

Для защиты от поражения электрическим током при замыкании приборов на корпус должны применяться следующие меры электробезопасности:

- защитное заземление ($R < 4 \text{ Ом}$);
- изоляция;
- защитное отключение;
- дверца рубильника должна находиться в закрытом состоянии, под замком;
- работник должен быть обеспечен средствами индивидуальной защиты (диэлектрические перчатки, боты, инструменты с изолирующими ручками, резиновый коврик, деревянная лестница, указатель напряжения, резиновые коврики, резиновые сапоги, деревянные лестницы).

Для обеспечения электробезопасности в СИЗ все следующие инструменты применяются с изолированными ручками: отвёртки, бокорезы, молотки, монтажные ножи, круглогубцы, обжимные клещи.

Средства коллективной защиты от поражения электрическим током: оградительные устройства; устройства автоматического контроля и сигнализации; изолирующие устройства и покрытия; устройства защитного заземления и зануления; устройства автоматического отключения; устройства выравнивания потенциалов и понижения напряжения; устройства дистанционного управления; предохранительные устройства; молниеотводы и разрядники; знаки безопасности.

При поражении электрическим током следует необходимо освободить пострадавшего от действия электрического тока, обесточив установку с помощью главного рубильника, расположенного на распределительном щите, вызвать скорую помощь и, до её прибытия, оказать пострадавшему первую медицинскую помощь. При необходимости делать искусственное дыхание.

Одной из особенностей поражения электрическим током является отсутствие внешних признаков грозящей опасности, которые человек мог бы заблаговременно обнаружить с помощью органов чувств: увидеть, услышать, обонять и т.д. В большинстве случаев человек включается в электрическую сеть либо руками, либо рукой и ногами. Проходящий при этом ток приводит к серьезным повреждениям центральной нервной системы и таких жизненно важных органов, как сердце и легкие.

6.3.2 Шум

Повышенный шум ухудшает условия труда, оказывает вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум – беспорядочное сочетание различных по частоте и силе звуков, мешающих человеческой деятельности и вызывающих неприятные

ощущения. Источниками шума являются колеблющиеся тела, звуковые волны от которых вызывают периодическое повышение или понижение давления воздуха. На эти изменения давления и реагируют органы слуха. Ухо человека способно реагировать на изменения от $2 \cdot 10^{-5}$ до 200 Па – эти величины являются пороговыми. Верхний порог слышимости также называют болевым порогом.

Продолжительное воздействие шума может привести к шумовой болезни – заболеванию организма, которое сопровождается поражением органов слуха и центральной нервной системы. Также шум вызывает головную боль, раздражительность, быструю утомляемость, потерю слуха, повышение артериального давления.

Допустимые нормы шума установлены санитарными нормами СН 2.2.4/2.1.8.562–96 [54] и представлены в таблице 21.

Таблица 21 – Допустимые уровни звукового давления

Полоса частот, Гц	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Уровни звукового давления, дБ	107	95	87	82	78	75	73	71	69
Уровни звука, дБА	80								
Эквивалентные уровни звука, дБА	80								

Предельно допустимый уровень шума – это уровень фактора, который при ежедневной работе не должен вызывать заболеваний или отклонений в состоянии здоровья. Соблюдение предельно допустимого уровня шума не исключает нарушения здоровья у сверхчувствительных лиц.

Допустимый уровень шума ограничен ГОСТ 12.1.003-83 и СанПиН 2.2.4/2.1.8.10-32-2002 [52]. Максимальный уровень звука постоянного шума на рабочих местах не должно превышать 80 дБА. В нашем случае этот параметр соответствовал значению 75 дБА.

При значениях выше допустимого уровня необходимо предусмотреть средства коллективной (СКЗ) и индивидуальной защиты (СИЗ).

К СКЗ относятся: устранение причин шума или существенное его ослабление в источнике образования; изоляция источников шума от окружающей среды средствами звуко- и виброизоляции, звуко- и вибропоглощения (например, микропористая резина); применение средств, снижающих шум и вибрацию на пути их распространения. К СИЗ – применение спецодежды, спецобуви и защитных средств органов слуха: наушники, беруши, антифоны.

6.3.3 Ионизирующее излучение

В процессе работы с источниками ионизирующего излучения необходимо соблюдать технику безопасности для предотвращения воздействия повышенного уровня излучения на обслуживающий персонал. При работе с источниками излучения могут применяться средства коллективной и индивидуальной защиты.

К средствам коллективной защиты при работе с ионизирующим излучением относятся:

- Защита расстоянием. Ионизирующее излучение сильно ослабевает при отдалении от источника, так же наблюдается угловое ослабление;
- Экранирование при помощи тяжелых металлов (свинец, вольфрам, сталь и др);
- Защита временем. Ионизирующее излучение обладает свойством накопления. Поэтому, чем меньше времени работник находится в зоне воздействия ионизирующего излучения, тем меньший вред будет нанесен его здоровью.
- Применение звуковой и световой сигнализации, табличек, информирующих о соблюдении осторожности в рабочей территории.

К средствам индивидуальной защиты при работе с ионизирующим излучением относятся:

- Систематический дозиметрический контроль за уровнями внешнего и внутреннего облучения обслуживающего персонала, а также за уровнем радиации в окружающей среде.
- Использование противогазов или масок с автоматической подачей чистого воздуха.
- При высоких уровнях радиоактивного загрязнения применяют пневмокостюмы из пластических материалов с принудительной подачей чистого воздуха под костюм;
- Химическая защита. Ослабление результата воздействия ионизирующего излучения за счет введения в организм радиопротекторов.

Нормы радиационной безопасности регулируются документом СанПиН 2.6.1.2523-09. Основные пределы доз приведены в таблице 22:

Таблица 22 – Основные пределы доз

Нормируемые величины	Пределы доз	
	Персонал (группа А)	Население
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год	1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год
Эквивалентная доза за год в хрусталике глаза	150 мЗв	15 мЗв
Коже	500 мЗв	50 мЗв
Кистях и стопах	500 мЗв	50 мЗв

Основные пределы доз, как и все остальные допустимые уровни воздействия персонала группы Б, равны 1/4 значений для персонала группы А.

Эквивалентная доза характеризует биологический эффект облучения организма ионизирующим излучением. Эквивалентная доза равна поглощённой дозе в ткани или органе, умноженной на взвешивающий коэффициент данного вида излучения (WR), отражающий способность излучения повреждать ткани организма

Основные пределы доз облучения не включают в себя дозы от природного и медицинского облучения, а также дозы вследствие радиационных аварий.

6.3.4 Пожаровзрывобезопасность

В лаборатории корпуса имеется деревянная мебель и электрооборудование, поэтому данное помещение имеет пожароопасность категории В. К данной категории относятся производства связанные с применением горючих и трудногорючих жидкостей, твердых горючих и трудно горючих веществ, способных при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом только гореть при условии, что помещения, в которых этих вещества находятся, не относятся к категориям А или Б.

К первичным средствам пожаротушения относятся: огнетушители, внутренние пожарные краны, ящики с песком, противопожарные щиты с набором инвентаря и др.

Для тушения пожара в рассматриваемой лаборатории следует использовать следующие виды огнетушителей:

- углекислотные (ОУ-1, ОУ-2, ОУ-3 или ОУ-4, ОУ-5, ОУ-6), предназначенные для тушения загораний различных горючих материалов и горючих жидкостей, а также электроустановок находящихся под напряжением до 10000В (только после отключения питания электроустановок);
- хладоновые (ОАХ, ОХ-3, СОТ-5М), предназначенные для тушения легковоспламеняющихся и горючих жидкостей, твердых веществ, электроустановок под напряжением и различных материалов, кроме щелочных металлов и кислородсодержащих веществ;
- порошковые (П-2АП, Феникс АВС-7, ПФ, ПСБ-3), предназначенные для тушения электрооборудования под напряжением не выше 1000 В.

Для обеспечения безопасности при пожаре должна включаться предупредительная сигнализация. При автоматической пожарной сигнализации используются датчики, реагирующие на появление открытого огня, дыма и повышение температуры.

На рисунке 13 приведён план эвакуации при пожаре.



Рисунок 13 – План эвакуации при пожаре

6.4 Экологическая безопасность

Российское законодательство строго запрещает выбрасывать экологически опасную технику вместе с бытовым мусором. Эта норма содержится в статье 8.2 Кодекса об административных правонарушениях [53].

Для утилизации можно вывезти старое оборудование на специально оборудованный полигон, или же разобрать оборудование и переработать образовавшееся вторичное сырье.

Ввиду того, что некоторые электронные компоненты в своём составе могут иметь драгоценные и редкоземельные металлы, рекомендуется производить переработку списанного оборудования и приборов.

В ходе выполнения данной работы никаких отходов при работе за компьютером не было. Таким образом, негативного воздействия на атмосферу, литосферу и гидросферу не оказывалось. Однако негативное воздействие возникает при утилизации компьютеров и электрооборудования.

Профессиональная утилизация бытовой техники включает в себя извлечение вторичного сырья, которое затем заново поступает в хозяйственный оборот. Переработка вторсырья экономически эффективна, сокращает потребление ресурсов и помогает сохранить окружающую среду [54]. Существуют специальные фирмы, занимающиеся переработкой электрооборудования и бытовой техники.

Бумажные отходы и картриджи передаются в соответствующие органы по переработке бумаги.

В люминесцентных лампах, использующихся для освещения помещения, в котором производилась разработка устройства, содержится ртуть, относящаяся к ядовитым веществам первого класса. Такие лампы складываются в жесткую тару, обеспечивающую фиксацию положения ламп. После того, как тара наполняется, она подлежит утилизации.

Ввиду того, что разработанное устройство в процессе своей эксплуатации находится длительное время непосредственно под воздействием ионизирующего излучения, его нельзя утилизировать как обычное электрооборудование. Согласно требованиям СанПин 2.6.1.2891-11, утилизация рентгеновского оборудования должна выполняться только по специальной технологии и только теми организациями, которые имеют лицензию на извлечение, демонтаж и ликвидацию. При транспортировке рентгеновского оборудования необходимо сообщить в региональное отделение Госавтоинспекции для оформления накладной по перевозке опасного груза.

6.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

К возможным ЧС на рабочем месте можно отнести внезапное обрушение здания, взрывы и пожары [55].

Наиболее вероятны – пожары вследствие замыкания электрической проводки, возгорания неисправного ПЭВМ, несоблюдения правил пожарной безопасности.

Для оповещения о возникшем пожаре в организации установлены пожарные речевые системы оповещения, с требуемыми параметрами: уровень развиваемого давления 70 – 110дБА, равномерность частотной характеристики не более 16 дБ. Кабинет оснащен огнетушителем ОУ - 5, расположенным на видном месте.

Рабочий кабинет по пожарной безопасности относится к категории Д в нём находятся негорючие материалы и вещества в холодном состоянии. По степени огнестойкости данное помещение относится к 3-й степени огнестойкости. Возможные причины пожара: перегрузка в электросети, короткое замыкание, разрушение изоляции проводников.

Возможная чрезвычайная ситуация на данном рабочем месте – возникновение пожара.

К мерам пожарной профилактики относятся:

- повышение огнестойкости здания;
- использование исключительно исправного оборудования;
- проведение периодических инструктажей по пожарной безопасности;
- отключение электрооборудования, освещения и электропитания по окончании работ;
- содержание путей и проходов для эвакуации людей в свободном состоянии.

Первичные средства пожаротушения обычно применяют до прибытия пожарной команды. В случаях, когда не удастся ликвидировать пожар самостоятельно, необходимо вызвать пожарную охрану и покинуть помещение, руководствуясь разработанным и вывешенным планом эвакуации.

Здание должно соответствовать требованиям пожарной безопасности, а именно, наличие охранно-пожарной сигнализации, плана эвакуации (рис. 4), порошковых огнетушителей с поверенным клеймом, табличек с указанием направления к запасному (эвакуационному) выходу.

В общественных зданиях и сооружениях на каждом этаже должно размещаться не менее двух переносных огнетушителей. Огнетушители следует располагать на видных местах вблизи от выходов из помещений на высоте не более 1,35 м. Размещение первичных средств пожаротушения в коридорах, переходах не должно препятствовать безопасной эвакуации людей [55].

Проводятся ежемесячные обучения правилам пожарной безопасности под роспись в журнале «Правила пожарной безопасности».

Природными источниками чрезвычайных ситуаций (ЧС) на рассматриваемом рабочем месте могут быть сильные морозы зимой.

В целях обеспечения устойчивой работы корпуса необходимо соблюдение следующих мер предосторожности:

Плотно закрыть окна, двери, чердачные люки и вентиляционные отверстия.

При подготовке к зиме на склад нужно завести:

1. бензо- или дизель- электрогенератор;
2. газокатализаторный калорифер;
3. запас воды (минимум на сутки) питьевой и сантехнической;
4. собственный теплый пассажирский транспорт.

Техногенными источниками чрезвычайных ситуаций (ЧС) на рассматриваемом рабочем месте может быть несанкционированное проникновение посторонних на рабочее место.

В целях предотвращения данного источника ЧС необходимо:

- оборудовать лабораторию системой видеонаблюдения;
- оборудовать лабораторию системой сигнализации;
- организовать круглосуточную охрану и пропускную систему;
- обеспечить надёжную систему связи.

6.6 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Продолжительность рабочего дня не должна превышать 40 часов в неделю. На данном предприятии действует пятидневная рабочая неделя – 8-ми часовой рабочий день.

Сокращенный рабочий день для людей до 16 лет – 24 часа в неделю, для людей от 16 до 18 лет – 35 часов в неделю, для инвалидов не более 35 часов в неделю. Также рабочее время зависит от условий труда: для работников, работающих на рабочих местах с вредными условиями для жизни - не больше 36 часов в неделю.

Возможно сокращение рабочего времени. Для работников до 16 лет – не более 24 часа в неделю, от 16 до 18 лет – не более 35 часов, как и для инвалидов I и II группы. Для работников, работающих на местах, отнесенных к вредным условиям труда 3 и 4 степени – не более 36 часов.

Может устанавливаться неполных рабочий день для беременной женщины; одного из родителей (опекуна, попечителя), имеющего ребенка в возрасте до четырнадцати лет (ребенка-инвалида в возрасте до восемнадцати лет). Оплата труда при этом производится пропорционально отработанному времени. Ограничений продолжительности ежегодного основного оплачиваемого отпуска, исчисления трудового стажа и других трудовых прав при этом не имеется.

Сокращается на один час рабочая смена при работе в ночное время (с 22.00 до 6.00 часов). К такой работе не допускаются беременные женщины; работники, не достигшие возраста восемнадцати лет; женщины, имеющие детей в возрасте до трех лет, инвалиды, работники, имеющие детей-инвалидов, а также работники, осуществляющие уход за больными членами их семей в соответствии с медицинским заключением, матери и отцы – одиночки детей до пяти лет.

Организация обязана предоставлять ежегодные отпуска продолжительностью 28 календарных дней. Для работников, занятых на

работах с опасными или вредными условиями, предусматривается дополнительный отпуск.

Работнику в течение рабочего дня должен предоставляться, перерыв не более двух часов и не менее 30 минут, который в рабочее время не включается.

Всем работникам предоставляются выходные дни, работа в выходные дни производится только с письменного согласия работника.

Организация выплачивает заработную плату работникам. Возможно удержание заработной платы, в случаях, предусмотренных ТК РФ ст. 137. В случае задержки заработной платы более чем на 15 дней работник имеет право приостановить работу, письменно уведомив работодателя.

Запрещается дискриминация, принудительный труд.

Заработная плата каждого работника зависит от его квалификации, сложности выполняемой работы, количества и качества затраченного труда и максимальным размером не ограничивается.

Запрещается дискриминация при установлении и изменении условий оплаты труда. [ТК РФ ст. 132]

Заработная плата выплачивается работнику, как правило, в месте выполнения им работы либо перечисляется на указанный работником счет в банке на условиях, определенных коллективным договором или трудовым договором. Место и сроки выплаты заработной платы в не денежной форме определяются коллективным договором или трудовым договором. Заработная плата выплачивается непосредственно работнику, за исключением случаев, когда иной способ выплаты предусматривается федеральным законом или трудовым договором. Заработная плата выплачивается не реже чем каждые полмесяца в день, установленный правилами внутреннего трудового распорядка, коллективным договором, трудовым договором. [ТК РФ ст.136]

При прекращении трудового договора выплата всех сумм, причитающихся работнику от работодателя, производится в день увольнения работника. Если работник в день увольнения не работал, то соответствующие суммы должны быть выплачены не позднее следующего дня после

предъявления уволенным работником требования о расчете. В случае спора о размерах сумм, причитающихся работнику при увольнении, работодатель обязан в указанный в настоящей статье срок выплатить не оспариваемую им сумму. [ТК РФ ст. 140]

Требования к рабочему месту при выполнении работы в сидячем положении указаны в ГОСТ 12.2.032-78 «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования». Невыполнение данных требований к расположению рабочего места может привести к получению работником производственной травмы или развития у него профессионального заболевания [7].

Конструкция оборудования и рабочего места при выполнении работ в положении сидя должна обеспечивать оптимальное положение работающего, которое достигается регулированием высоты рабочей поверхности, высоты сидения, оборудованием пространства для размещения ног и высотой подставки для ног.

СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 прописывает требования (таблица 23) к помещениям для эксплуатации ПЭВМ, из которых следует, что в помещении должно иметься естественное и искусственное освещение [56].

Таблица 23 – Требования к организации и оборудованию рабочих мест с ПЭВМ

Требования	Требуемые значения параметров	Значения параметров в кабинете
Высота рабочей поверхности стола	680-800 мм	750 мм
Расположение монитора от глаз пользователя	600-700 мм	655 мм
Расположение клавиатуры на поверхности стола от края	100-300 мм	200 мм
Высота стула над полом (для роста 161-170 мм)	420 мм	400 мм
Угол наклона монитора	0-30 градусов	10 градусов

Конструкция рабочего стула должна обеспечивать:

– ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм;

- поверхность сиденья с закругленным передним краем;
- регулировку высоты поверхности сиденья в пределах 400 - 550 мм и углам наклона вперед до 15 град, и назад до 5 град.;
- высоту опорной поверхности спинки 300 +/- 20 мм, ширину не менее 380 мм и радиус кривизны горизонтальной плоскости - 400 мм;
- угол наклона спинки в вертикальной плоскости в пределах плюс-минус 30 градусов;
- регулировку расстояния спинки от переднего края сиденья в пределах 260 – 400 мм;
- стационарные или съемные подлокотники длиной не менее 250 мм шириной - 50 - 70 мм;
- регулировку подлокотников по высоте над сиденьем в пределах 230 плюс-минус 30 мм и внутреннего расстояния между подлокотниками в пределах 350 – 500 мм.

Рабочее место пользователя ПК следует оборудовать подставкой для ног, имеющей ширину не менее 300 мм, глубину не менее 400 мм, регулировку по высоте в пределах до 150 мм и по углу наклона опорной поверхности подставки до 20°. Поверхность подставки должна быть рифленой и иметь по переднему краю бортик высотой 10 мм.

Чистота обязательна при работе за компьютером. Влажную уборку помещения следует проводить ежедневно. Недопустима запыленность воздуха, пола, рабочей поверхности стола и техники. Помещение должно быть оборудовано системами вентиляции, кондиционирования и отопления. Запрещается работа на компьютере в подвальных помещениях.

Значения параметров кабинета соответствуют установленным нормам. Рабочее место также необходимо оборудовать подставкой для ног, которая в кабинете отсутствует.

Заключение

Разработана математическая модель способа измерения эффективного атомного номера на основе оценки ослабления преимущественно мягкого и преимущественно жёсткого рентгеновского излучения, включающая в себя обобщённое уравнение измерителя, алгоритм обработки информации. Предложен подход к оценке чувствительности способа измерения эффективного атомного номера методом дуальных энергий на основе сэндвич-детектора. Исследована устойчивость алгоритма оценки эффективного атомного номера к шумам в исходной информации. Определены допустимые диапазоны изменения эффективного атомного номера и массовой толщины. Исследовано влияние параметров сэндвич-детектора на метрологические характеристики измерителя эффективного атомного номера. Рассмотрен подход к выбору материалов и толщин детекторов и промежуточного фильтра в методе распознавания материалов, основанного на однократном просвечивании объекта контроля пучком рентгеновского излучения с отдельной регистрацией мягких и жёстких фотонов. Подход базируется на сочетании максимальной чувствительности к изменению эффективного атомного номера и минимальной погрешности его оценки. Приведён пример выбора параметров детекторов и промежуточного фильтра для максимальных энергий рентгеновского излучения в диапазоне от 80 до 160 кэВ.

В ходе раздела «Социальная ответственность» были выявлены вредные и опасные факторы, которые могут нанести вред рабочему персоналу в процессе разработки метрологического обеспечения измерения эффективного атомного номера. Рассмотрены механизмы воздействия данных факторов на человека, нормы, которым они должны соответствовать, а также коллективные и индивидуальные средства защиты.

Из раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» можно сделать вывод, что проект обладает ресурсной эффективностью.

Список публикаций

1. Осипов С.П., Усачев Е.Ю., Чахлов С.В., Щетинкин С.А., Камышева Е.Н. Особенности распознавания материалов мультэнергетическим рентгеновским методом // Дефектоскопия. – 2019. – № 4. – С. 43–55.

Список использованных источников

1. Spiers F.W. Effective atomic number and energy absorption in tissues // The British journal of radiology. – 1946. – V. 19. – No. 218. – P. 52–63.
2. Murty R.C. Effective atomic numbers of heterogeneous materials // Nature. – 1965. – V. 207. – No. 4995. – P. 398–399.
3. Rutherford R.A., Pullan B.R., Isherwood I. X-ray energies for effective atomic number determination // Neuroradiology. – 1976. – V. 11. – No. 1. – P. 23–28.
4. Duvauchelle P., Peix G., Babot D. Effective atomic number in the Rayleigh to Compton scattering ratio // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 1999. – Vol. 155. – No. 3. – P. 221–228.
5. Phelps M.E., Gado M.H., Hoffman E.J. Correlation of effective atomic number and electron density with attenuation coefficients measured with polychromatic x rays // Radiology. – 1975. – V. 117. – No. 3. – P. 585–588.
6. Jayachandran C.A. Calculated effective atomic number and kerma values for tissue-equivalent and dosimetry materials // Physics in Medicine & Biology. – 1971. – V. 16. – No. 4. – P. 617–624.
7. Udod V.A., Osipov S.P., Wang Y. Comparative analysis of various definitions of the concept of effective atomic number of material of a multicomponent object // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2018. – V. 54. – No. 9. – P. 662–674.
8. Gorshkov V. The effective atomic number and the mass attenuation coefficient of a multicomponent object for the continuous spectrum of the radiation // Nondestructive Testing and Evaluation. – 2017. – V. 32. – No. 1. – P. 79–89.
9. Osipov S.P., Chakhlov S.V., Osipov O.S., Shtein A.M., Strugovtsev D.V. About accuracy of the discrimination parameter estimation for the dual high-energy method // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2015. – V. 81. – No. 1. – No. article 012082.

10. Осипов С.П., Усачев Е.Ю., Чахлов С.В., Щетинкин С.А., Камышева Е.Н. Особенности распознавания материалов мультэнергетическим рентгеновским методом // Дефектоскопия. – 2019. – № 4. – С. 43–55.
11. Alves H., Lima I., de Assis J.T., Neves A.A., Lopes R.T. Mineralogy evaluation and segmentation using dual-energy microtomography // X- Ray Spectrometry. – 2015. – V. 44. – V. 3. – P. 99–104.
12. Pires L.F. Soil analysis using nuclear techniques: A literature review of the gamma ray attenuation method // Soil and Tillage Research. – 2018. – V. 184. – P. 216–234.
13. McCollough C.H., Leng S., Yu L., Fletcher J.G. Dual-and multi-energy CT: principles, technical approaches, and clinical applications // Radiology. – 2015. – V. 276. – No. 3. – P. 637–653.
14. Осипов С.П. Распознавание материалов методом дуальных энергий при радиационном контроле объектов / С. П. Осипов, В. А. Удод, Я. Ван // Дефектоскопия. – 2017. – № 8. – С. 35–56.
15. Alvarez R.E. Lung field segmenting in dual-energy subtraction chest X-ray images // Journal of digital imaging. – 2004. – V. 17. – No. 1. – P. 45–56.
16. Rebuffel V., Dinten J.M. Dual-energy X-ray imaging: benefits and limits // Insight-non-destructive testing and condition monitoring. – 2007. – V. 49. – No. 10. – P. 589–594.
17. Kim D.W., Kim H.K., Youn H., Yun S., Han J.C., Kim J., Cunningham I. A. Signal and noise analysis of flat-panel sandwich detectors for single-shot dual-energy x-ray imaging // Medical Imaging 2015: Physics of Medical Imaging. – International Society for Optics and Photonics, 2015. – V. 9412. – No. article 94124A.
18. Ryzhikov V., Opolonin O., Galkin S., Lysetska O., Voronkin E. X-ray radiation detectors of “scintillator-photodiode” type for security and nondestructive testing // 2011 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. – IEEE, 2011. – P. 2204–2207.

19. Allec N. Multilayer energy discriminating detector for medical X-ray imaging Applications. – Doc. Diss. – Waterloo, Ontario, Canada, 2012.
20. Ryzhikov V.D., Kozin D., Lysetskaya O., Kostyukevich S. Detectors for multi-energy radiography // *Hard X-Ray and Gamma-Ray Detector Physics V.* – International Society for Optics and Photonics, 2004. – V. 5198. – P. 254–261.
21. Treeaporn V., Neifeld M.A. Detection with polychromatic x-ray pencil beam illumination: information-theoretic bounds // *Applied Optics.* – 2018. – Vol. 57. – no. 9. – P. 1977–P 1992.
22. Rogers T.W., Jaccard N., Morton E.J., Griffin L.D. Automated x-ray image analysis for cargo security: Critical review and future promise // *Journal of X-ray science and technology.* – 2017. – Vol. 25. – no. 1. – P. 33–56.
23. Duvillier J., Dierick M., Dhaene J., Van Loo D., Masschaele B., Geurts R., Hoorebeke L.V., Boone M.N. Inline multi-material identification via dual energy radiographic measurements // *NDT & E International.* – 2018. – Vol. 94. – P. 120–125.
24. Linev L., Lineva E., Pozdnyakov D., Emelianov I., Sosenko K. Portal monitoring devices // *Engineering of Scintillation Materials and Radiation Technologies: Proceedings of ISMART 2016.* – 2017. – Vol. 200. – P. 325–338.
25. Karoly S. Technologies to counter aviation security threats // *AIP Conference Proceedings.* – AIP Publishing, 2017. – Vol. 1898. – no. 1. – no. article 050002.
26. Chen G., Bennett G., Perticone D. Dual-energy X-ray radiography for automatic high-Z material detection // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms.* – 2007. – Vol. 261. – no. 1-2. – P. 356–359.
27. Osipov S. P., Udod V. A., Wang Y. Identification of materials in X-Ray inspections of objects by the dual-energy method // *Russian Journal of Nondestructive Testing.* – 2017. – Vol. 53. – no. 8. – P. 568–587.

28. Dmitruk K., Mazur M., Denkowski M., Mikolajczak P. Method for filling and sharpening false colour layers of dual Energy X-ray images // IFAC-PapersOnLine. – 2015. – Vol. 48. – no. 4. – P. 342–347.
29. Klimenov V.A., Osipov S.P., Temnik A.K. Identification of the substance of a test object using the dual-energy method // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2013. – Vol. 49. – no. 11. – P. 642–649.
30. Bonnin A., Duvauchelle P., Kaftandjian V., Ponard P. Concept of effective atomic number and effective mass density in dual-energy X-ray computed tomography // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2014. – Vol. 318. – P. 223–231.
31. Shi X. Improving object classification in X-ray luggage inspection, Ph. D. dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, February 2000. URI: <http://hdl.handle.net/10919/28389>
32. Rebuffel V., Dinten J. M. Dual-energy X-ray imaging: benefits and limits // Insight-non-destructive testing and condition monitoring. – 2007. – Vol. 49. – no. 10. – P. 589–594. (0,7 мм 160 кэВ)
33. Runkle R. C., White T. A., Miller E. A., Caggiano J. A., Collins B. A. Photon and neutron interrogation techniques for chemical explosives detection in air cargo: A critical review // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2009. – Vol. 603. – no. 3. – P. 510 – 528.
34. Brooks R.A., Di Chiro G. Split-detector computed tomography: A preliminary report // Radiology. – 1978. – Vol. 126. – P. 255–257.
35. Barnes G. T., Sones R. A., Tesic M. M., Morgan D. R., Sanders J. N. Detector for dual-energy digital radiography // Radiology. – 1985. – Vol. 156. – no. 2. – P. 537–540
36. Fredenberg E. Spectral and dual-energy X-ray imaging for medical applications // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2018. – Vol. 878. – P. 74–87.

37. Выбор параметров детекторов в методе распознавания материалов на основе разделения мягкой и жесткой составляющих рентгеновского излучения [Текст] / С. П. Осипов [и др.] // Дефектоскопия. – 2018. – № 11. – С. 57–68.

38. Осипов С.П., Чахлов С.В., Кайролапов Д.У., Сиротьян Е.В. Численное моделирование радиографических изображений — основа корректного проектирования систем цифровой радиографии крупногабаритных объектов // Дефектоскопия. — 2019. № 2. С. 43—55.

39. Hubbell J.H., Seltzer S.M. Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients 1 keV to 20 MeV for elements Z= 1 to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest. – National Inst. of Standards and Technology-PL, Gaithersburg, MD (United States). Ionizing Radiation Div., 1995. – №. PB-95-220539/XAB; NISTIR-5632.

40. Koukou V., Martini N., Michail C., Sotiropoulou P., Fountzoula C., Kalyvas N., Kandarakis I., G. Nikiforidis. G., Fountos G. Dual energy method for breast imaging: a simulation study // Computational and mathematical methods in medicine. – 2015. – Vol. 2015. – Article ID 574238. – 8 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/574238>

41. Завьялкин Ф.М., Осипов С.П. Зависимость среднего значения и флуктуаций поглощенной энергии от размеров сцинтиллятора // Атомная энергия. – 1985. – Т. 59. – вып. 4 – С. 281–283.

42. Udod V.A., Osipov S.P., Wang Y. The Mathematical Model of Image, Generated by Scanning Digital Radiography System // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2017. – Vol. 168. – No. 1. – Article ID 012042. – 6 p.

43. Van Loef E.V.D., Dorenbos L.P., Van Eijk C.W.E., Kramer K., Gudel H.U. Scintillation properties of $\text{LaCl}_3\text{:Ce}^{3+}$ crystals: fast, efficient, and high-energy resolution scintillators // IEEE transactions on nuclear science. – 2001. – Vol. 48. – No. 3. – P. 341–345.

44. Badano A. Optical blur and collection efficiency in columnar phosphors for x-ray imaging // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section

A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2003. – Vol. 508. – No. 3. – P. 467–479.

45. Watanabe S. Hybrid manipulations for the solution of systems of nonlinear algebraic equations // Publications of the Research Institute for Mathematical Sciences. – 1983. – Vol. 19. – no. 2. – P. 367–395.

46. Alvarez R.E., Macovski A. Energy-selective reconstructions in x-ray computerised tomography // Physics in Medicine & Biology. – 1976. – Vol. 21. – no. 5. – P. 733–744.

47. Lionheart W. R. B., Coban S. B. Nonlinear problems in fast tomography // Developments in X-Ray Tomography XI. – International Society for Optics and Photonics, 2017. – Vol. 10391. – no. article 1039116.

48. Semerci O., Miller E. L. A parametric level-set approach to simultaneous object identification and background reconstruction for dual-energy computed tomography // IEEE transactions on image processing. – 2012. – Vol. 21. – no. 5. – P. 2719–2734.

49. Babaheidarian P. Algorithms for enhanced artifact reduction and material recognition in computed tomography : Diss. – Boston University, 2018.

50. СНиП 23-05-95 Естественное и искусственное освещение.

51. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений СанПиН 2.2.4-548-96.

52. ГОСТ Р 12.1.019-2009 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

53. ГН 2.2.5.1313-03 Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны.

54. СП 12.13130.2009 Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.

55. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования.

56. Постановление Правительства РФ от 4 апреля 2003г. №19

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Раздел

«Introduction. Literature review »

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ72	Камышева Екатерина Николаевна		

Консультант школы отделения (НОЦ) ИШНКБ, ОКД

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ведущий научный сотрудник РКНЛ РКД	Осипов С.П.	К.Т.Н., доцент		

Консультант – лингвист отделения (НОЦ) школы ШБИЦ, ОИЯ

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Смирнова У.А.	К.П.Н.		

1. Introduction

Any chemical element is characterized by atomic number. This characteristic takes integer values. Most natural and industrial materials are chemicals, mixtures, alloys. The effective atomic number is a natural extension of the concept called «atomic number». In more details about the sections related to the transfer of gamma radiation and X-ray radiation. Mathematically, the marked extension comes to a transformation of the domain of definition from integers from 1 (hydrogen) to 92 (uranium) to the real numbers from the same range. An effective atomic number is a number that is compared with the experimental value of the characteristic of some process of interaction of gamma or X-ray radiation with a material [1-3]. Absorption, transfer (transmission), and scattering are the processes of interaction of radiation with a material [4-6]. The basic applications of the concept of «effective atomic number» relate to dosimetry and to the recognition of materials. The need for material recognition, regardless of the mass thickness of the materials under study, led to the unification of various realizations of the dual energy method (DEM) and the multi-energy method with methods for estimating of the effective atomic number [7-10]. Recently, there has been an increase in applications to the second direction. Primarily, it is connected to the provision of transport and national security and the importance to prevent: the proliferation of weapons of mass destruction; the illegal movement of explosives, drugs and potent drugs; smuggling of goods. Nowadays, the scope of DEM with the estimation of the effective atomic number has expanded in mineralogy, geochemistry, hydrology, solid waste processing, etc. [11-13]. There are several implementations of DEM and MEM: classifications of these implementations are related to the formation of primary information and methods for processing this information [14-16]. The implementation of DEM on the basis of separation of mainly soft and hard X-rays carried out by using a sandwich detector is most effective from the point of view of monitoring the productivity, as well as the object is scanned by an X-ray beam with the maximum energy [17-20]. As mentioned in the implementation of the DEM, two initial radiographic images are formed during one scan, and unlike the classical implementation of the DEM (scanning the object of

control with two energies), the method based on recording X-ray radiation with a sandwich detector does not show a shift of the radiographic images relatively to each other.

With the development of modern society, there occurs urgent requirements of improving methods for measuring the effective atomic number, including the implementation of DEM based on sandwich detectors. Not in the least, the improvement of the mentioned implementation of the DEM, is connected with the development of the metrological provision of a method for evaluating the effective atomic number (EAN).

In addition, any control object (CO) is characterized by an effective atomic number of the material and the product of the density of the material by its thickness. This production is called mass thickness. Here, the metrological support is understood as a set of approaches: for constructing the equation (equations) of the EAN meter; to determine the range of variations of the EAN and the mass thickness for which a solution to the specified equation (equations) exists; to determine the sensitivity of estimating the EAN method. The issues of rational selection of the maximum energy of X-ray radiation, parameters of a sandwich detector (materials of the first and second detectors, their sizes in the direction of the propagation of the radiation, material and thickness of the intermediate filter) are related to metrological support.

From the above, the topic of dissertation research is relevant, as evidenced by the increasing number of studies on various aspects of methods for evaluating the effective atomic number.

The object of research is inspection complexes with the function of material recognition by the dual energy method.

The subject of research is the metrological characteristics of the process of measuring the effective atomic number.

The purpose of the research is the development of metrological provision of an effective atomic number.

To achieve these purposes, the following tasks should be accomplished:

- to develop a mathematical model of the method of measuring the effective atomic number based on an estimation of the attenuation of a predominantly soft and predominantly hard X-ray radiation, which includes a generalized meter equation, an information processing algorithm;
- to propose a method for evaluating the sensitivity of the method of measuring the effective atomic number by the dual energy method based on a sandwich detector;
- to investigate the stability of the algorithm for estimating the effective atomic number to the noises in the initial information;
- to determine the allowable ranges of variation of the effective atomic number and mass thickness;
- to investigate the influence of the parameters of a sandwich detector on the metrological characteristics of an effective atomic number meter for various maximum X-ray energies.

Research methods. To solve the issues , the following methods were used: calculations; mathematical and numerical modeling; system analysis, management and information processing; planning of numerical and field experiments; statistical processing of experimental results, including various types of regression analysis.

Novelty of research:

- a mathematical model has been developed for measuring the effective atomic number based on an estimation of the attenuation of predominantly soft and predominantly hard X-rays, which includes a generalized equation of the meter, an information processing algorithm;
- an approach has been proposed to estimate the sensitivity of the method of measuring the effective atomic number using the dual energy method based on a sandwich detector;
- the stability of the algorithm for estimating the effective atomic number to noise in the initial information was investigated;
- the permissible ranges of variation of the effective atomic number and mass thickness are determined;

- the influence of the parameters of a sandwich detector on the metrological characteristics of an effective atomic number meter for various maximum X-ray energies is investigated.

The practical relevance of the thesis's results is that it can be used to design new and modernize existing inspection systems for baggage and hand luggage in order to improve the accuracy of the effective atomic number evaluation of control objects and their structural fragments.

The implementation of the thesis results. The results of the studies are implemented in a mathematical model of the method of estimating the effective atomic number in a variation of the dual energy method based on the separation of soft and hard components of X-ray radiation with a sandwich detector, in recommendations for choosing the parameters of the inspection system: maximum X-ray energy; the thicknesses of the first and second sandwich detectors; intermediate filter thickness.

Approbation of the research results. The main assumptions of the final qualifying study were discussed in the reports of the research study from the department of the control and diagnostics department of ES of NDTs in 2017 - 2019.

Publications. According to research results in 2018, an article was published in the journal «Defectoscopy» (HAC), a translated version of the Russian Journal of Non-destructive Testing (SCOPUS, WoS).

The issues for thesis defense:

- a mathematical model of the method of measuring the effective atomic number based on an estimation of the attenuation of a predominantly soft and predominantly hard X-ray radiation, which includes a generalized meter equation, an information processing algorithm;
- an approach to assessing the sensitivity of the method of measuring the effective atomic number by the dual energy method based on a sandwich detector;
- the results of the study of the stability of the algorithm for estimating the effective atomic number to noise in the initial information;

- the evaluation of permissible ranges of variation of the effective atomic number and mass thickness;
- the results of the assessment of the influence of the parameters of the sandwich detector on the metrological characteristics of an effective atomic number meter using the dual energy method for various maximum X-ray energies.

Literature Review

Over the past two decades, the main methods of inspection used by customs, border guards and passenger and freight services by various modes of transport have been various implementations of X-ray inspection systems (IS) with the material recognition feature of control objects (CO) [21-25]. With the help of IS, the internal contents of not only small-sized objects (baggage, hand luggage, international postal item), but also big-sized objects (vehicles, containers, tanks, wagons) are analyzed. All variations of recognition of CO materials and their structural fragments are based on the dual energy method (DEM) or the multi-energy method (MEM) [26-28]. In the methods mentioned above, features of the interaction of photon radiation with matter for various energies are used. In DEM (MEM), information is formed on the attenuation of the soft (mostly soft) and hard (mostly hard) components of X-ray radiation. Marked information allows you to recognize materials by some criteria. This criteria associated with recognition parameter (RP). The effective atomic number of a material or some function of it is explicitly used as the main recognition parameter; in this case, information about the effective atomic number of a material is used implicitly [29-31]. There are two approaches to the concept of dual energy method». In the narrow sense, DEM (MEM) is a method (methods) of obtaining information about the attenuation of X-ray fluxes with two (several) different maximum energies. Initially, this information was used to compensate for the artifact of non-monoenergeticity in computed tomography (CT), or for image analysis in dual-energy digital radiography (DDR). In a broad sense, the dual energy method (DEM) is understood as a method of determining the parameters of a control object to

attenuate X-rays from two energy ranges. Any control object is characterized by three parameters of the effective atomic number Z_{eff} , density and thickness H . It should be noted that for absorption (transmission) of X-ray control methods (except computed tomography), density and thickness cannot be separately estimated. The generalized parameter CO is the product of density and thickness H . This parameter is called mass thickness (mass density, surface density) and is measured in g / cm². So, the dual energy method and the multi-energy method, interpreted in the broad sense of these concepts, are intended to simultaneously evaluate the effective atomic number of a CO Z_{eff} material and the mass thickness of a material H .

In scientific literature, one of the classifying signs of various realizations of DEM (MEM) is a method for determining the attenuation parameters for two (several) energy ranges of X-rays. Among the entire set of methods for obtaining primary radiographic information in DEM (MEM), there are three methods. Each of the three methods correlates with its implementation of the MDE (MME).

The first method can be called a classic implementation of the DEM (MEM). Objects are scanned by X-ray beams with two (or several), specially selected maximum energies [27, 29, 32, 33]. X-ray registration is carried out, as a rule, by one detection system. Regardless of the Xmax radiation Emax maximum energy ranges (keV range or meV range), radiation with a lower maximum energy $E_{\text{max}} = E_L$ (Law Energy) with a sufficient degree of conditionality is called soft radiation, and with a larger maximum energy $E_{\text{max}} = E_H$, $E_H > E_L$, hard radiation (High Energy). From the proposed description of the classical implementation of MDE (MME) arises the need to increase the required time by two or several times for scanning compared to scanning in the CR. This, of course, is a negative factor for the IC' s end user.

In the second method, DEM (MEM) uses an X-ray source with one maximum energy of Emax. The necessary digital radiographic images are formed in one scan of an object with an X-ray beam [32, 34–36]. Information is obtained on the basis of non-rigid separation of the soft and hard components of the energy spectrum of radiation. In this case, it is customary to speak of «predominantly soft» (Law Energy) and «predominantly hard» (High Energy) components. The noted non-hard

separation of the flux of recorded photons by energy is achieved by using multichannel X-ray recorders (MXR), each of the channels of which is a sandwich detector. Regardless of the type of MXR used (combined recorder (CR) or direct conversion recorder (DCR)), the sandwich detector consists of two detectors of the first and second detectors. Here, the order of the detectors is calculated in the direction of propagation of unscattered (primary) photons of X-rays. Proper selection of materials and thicknesses of radiation-sensitive transducers (RST) ensures proper separation into the «predominantly soft» (first sandwich detector) and «predominantly hard» (second sandwich detector) components of X-ray radiation. Incomplete severity of X-ray photon flux separation is determined by the finite probability of detecting high-energy (hard) photons in the first sandwich detector and the final probability of passing through the material of the first low-energy (soft) photons detector and their subsequent registration in the second sandwich detector. To reduce the second of these probabilities, the X-ray flux behind the first detector is filtered, for which an intermediate filter is used. It should be noted that there is no fundamental difference in the use of scintillators in CR and semiconductors in PPD as RST of the first and second sandwich detectors.

The implementation of the dual energy method described above can be called a two-detector or one-detector implementation, despite the apparent contradiction between the uniqueness of the maximum energy and the dualism of energy. The dualism of energies in this case consists in registering the first sandwich detector with a «predominantly soft» component of x-ray radiation, and the second sandwich detector with a «predominantly hard» component of the X-ray radiation.

We illustrate the effect of X-ray separation into «predominantly soft» and «predominantly hard» components. Calculations of the most suitable for illustration of informative parameters, which are the numerical energy spectra of the absorbed energy $f_L(E_{\max}, h, Z, E)$ and $f_H(E_{\max}, h, Z, E)$ for RST of the first and second sandwich detectors with $E_{\max} = 160$ keV and values of the mass thickness of the test object from aluminum ($Z = 13$) $h \{0 \text{ g / cm}^2; 1 \text{ g / cm}^2; 6 \text{ g / cm}^2\}$. The RST material of the first detector is Gd₂O₂S (GOS) scintillation ceramics, thickness $h_L =$

0.5 mm, the RST of material of the second detector is CsI single crystals, thickness 10 mm, intermediate sandwich filter is made of copper $h_F = 0.5$ mm thick. The conditions for calculations are close to the conditions from [32, 34–36].

Figure 1 shows the results of calculations of the numerical energy spectra of the absorbed energy in the form of the corresponding graphs obtained in the system for mathematical calculations of MathCad.

The graphs shown in Figure 1 clearly demonstrate the effect of non-rigid separation of X-rays into «predominantly soft» and «predominantly hard» components. So for the RST of the first sandwich detector for the considered example, the average value of absorbed energy varies from 40 keV to 80 keV for mass thickness variations from 0 to 6 g / cm², and from 100 keV to 110 keV for RFP of the second sandwich detector.

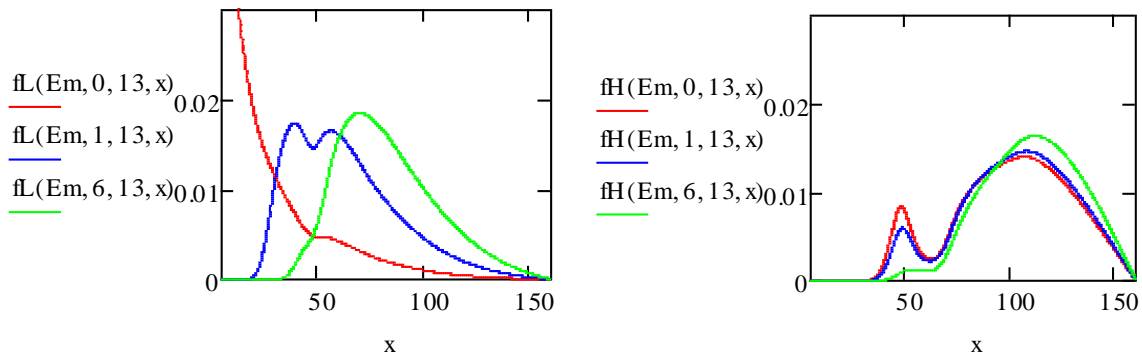


Figure 1. Numerical energy spectrum of absorbed energy $f_L(E_{\max}, h, Z, E)$ and $f_H(E_{\max}, h, Z, E)$ for RST of the first and second sandwich detectors

In the third method, DEM (MEM), as in the second method, uses a single X-ray study source with one maximum energy E_{\max} . Separation is carried out on the basis of the amplitude analysis of signals caused by the registration of individual photons from each detector of the X-ray recorder. Each channel of the amplitude analyzer forms its digital radiographic image. The number of channels is over two. This separation of photons by energy is hard, and the mode corresponding to the registration of X-rays is called spectrometric. Recently, a wide range of multichannel spectrometric X-ray recorders based on combined detectors and direct conversion detectors (DCD) is presented on the market of scientific equipment.

From the analysis of the first, second and third DEM methods, it can be concluded that the second and third methods are much more effective in monitoring performance, which makes them advantageous in the eyes of the end user of inspection systems with the material recognition function of control objects and their structural fragments. But the third method has a huge disadvantage for the end user with the high cost of X-ray recorders operating in the spectrometric registration mode. This implies an even greater attractiveness of the second DEM method for the end user of inspection complexes.

Based on the analysis of the features of X-ray transfer processes and its registration in the first and second sandwich detector, we can formulate a number of fairly qualitatively obvious suggestions concerning not only the monitoring performance, but also the metrological characteristics of the designed inspection inspection complexes for the DEM implementation under consideration:

- reducing the thickness (density, effective atomic number of the material) of the radiation-sensitive transducer of the first sandwich detector reduces the registration efficiency and the corresponding number of photons registered, and the decrease in the number of photons registered causes, an increase in noise in the first digital radiographic image and recognition parameter (in the evaluation of the effective atomic number);
- increasing the thickness (density, effective atomic number of the material) of the RST of the first sandwich detector leads to an increase in its registration efficiency, resulting in a decrease in the flow of photons that enter the RST of the second sandwich detector, and the noise level in the second digital radiographic image increases, soft and predominantly hard X-ray components;
- a reduction in the thickness (density, effective atomic number of the material) of the intermediate filter causes a decrease in the quality of the separation of the X-ray photon flux into «predominantly soft» and «predominantly hard» photons;
- an increase in the thickness (density, effective atomic number of the material) of the intermediate filter leads to two differently directed, in terms of the quality of control, factors that improve the quality of separation of «predominantly soft» and

«predominantly hard» components of X-ray radiation (of course, a positive factor) and increase the noise level radiographic image and image recognition parameter (of course, a negative factor).

From the proposals formulated above follows the existence of proper, in terms of the quality of recognition, (accuracy of the effective atomic number evaluation of the test object) meanings of the parameters of the first and second sandwich detectors and intermediate filter.

In the scientific and technical literature, issues related to the metrological assurance of the implementation of the dual energy method based on the separation of «predominantly soft» and «predominantly hard» photons from the integral X-ray flux are not sufficiently considered. This concerns not only issues related to the construction of the meter system of equations, but issues related to estimating the systematic and statistical errors in measuring the effective atomic number, outlining the range of EHR and mass thickness for which a unique estimate of the effective atomic number of the material is possible. The metrological support of the effective atomic number meters also includes issues related to the influence of the maximum X-ray energy and parameters of the sandwich detectors on the sensitivity of the method to changes in the effective atomic number and noise level in the primary digital radiographic images.

From the analysis of literary sources and the material discussed above, we can conclude about the relevance and necessity of research on the topic of the thesis aimed at developing a metrological assurance of an effective atomic number estimate. From the above, we can formulate a number of tasks to achieve the goal

- to develop a mathematical model for measuring the effective atomic number, based on the evaluation of the attenuation of «predominantly soft» and «predominantly hard» X-rays, the mathematical model should include a generalized equation (s) of the meter, an information processing algorithm;
- to analyze existing approaches to assessing the sensitivity of the method of measuring the effective atomic number by the dual energy method based on X-ray




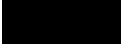








recorders from sandwich detectors and to make the selection of the most rational of the considered approaches;

- to investigate the stability of the algorithm for estimating the effective atomic number to noise in the original digital radiographic images;
- to determine the allowable ranges of the effective atomic number and mass thickness, in which the meter equations have a single solution;
- to investigate the effect of the parameters of sandwich detectors on the metrological characteristics of an effective atomic number meter for various maximum X-ray energies.

In the following sections, we consider in detail the solution of all the problems listed above as applied to the measurement of the effective atomic number by a method based on the implementation of the dual energy method, based on the separation of the «predominantly soft» and «predominantly hard» components of the X-ray radiation from an intermediate filter sandwich.

During the writing of the thesis were used the materials of the article [38].

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Диаграмма Ганта

№ работ	Вид работ	Исполнители	Кол-во дней, Т _{раб}	Продолжительность выполнения работ														
				Февраль 2019			Март 2019			Апрель 2019			Май 2019			Июнь 2019		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Составление и утверждение темы проекта	Р	2															
2	Выдача технического задания НИР	Р	5															
3	Поиск и изучение материала по теме	С	15															
4	Подбор, изучение и анализ требований нормативных документов	С	15															
5	Выбор направления исследований	Р, С	6															
6	Календарное планирование работ	Р, С	5															
7	Изучение научно-технической литературы	С	25															
8	Изучение научных исследований, научных статей	С	20															
9	Согласование проекта документа с руководством предприятия	С	4															
10	Оценка эффективности полученных результатов	Р, С	6															
11	Вывод по цели	С	3															
12	Завершение оформления работы	С	10															



– Руководитель (Р)



– Студент (С)